

# LA PHYTOREMÉDIATION DES SOLS DANS LE SERTÃO BRÉSILIEN

par  
Valérie Tchang

essai présenté au Département de biologie  
en vue de l'obtention du grade de maître en écologie internationale (M.E.I.)

Sous la direction de Monsieur Robert Bradley

FACULTÉ DES SCIENCES  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Montréal, Québec, Canada, 2018

## Sommaire

La contamination des sols est une problématique mondiale qui contribue à leur dégradation. Les sols sont de plus en plus sollicités par les activités humaines qui les modifient et les endommagent par, entre autres, une utilisation agricole inadaptée et non durable. Au Brésil, particulièrement dans la région semi-aride, ce phénomène n'est pas exclu et touche de nombreux habitants qui n'ont pas nécessairement les ressources pour faire face à cette problématique. De plus, les impacts environnementaux qui en découlent peuvent avoir des répercussions majeures sur le bon fonctionnement des écosystèmes. Dans une optique de durabilité des écosystèmes et d'une préoccupation de santé mondiale, ce travail se veut une porte d'entrée vers des solutions qui peuvent être apportées concrètement sur le terrain et qui concernent les habitants.

L'analyse d'une technique simple et peu coûteuse est proposée: la phytoremédiation. Celle-ci utilise la croissance naturelle des plantes dans le but de décontaminer les sols pollués. Ainsi, elle pourrait être implantée chez les petits et moyens propriétaires de terres qui sont aux prises avec des sols contaminés, fruit de l'utilisation massive des produits phytosanitaires et des conséquences de l'irrigation ayant entraîné la salinisation des terres. Afin de bien comprendre le contexte dans lequel cette technique doit évoluer, l'accent est mis sur les paramètres biophysiques et sociaux de la région du Sertão brésilien, notamment le climat semi-aride, le biome particulier qui s'y trouve ainsi que la situation précaire des habitants, d'un point de vue financier et social. Ainsi, suite à une analyse de faisabilité concernant les paramètres spécifiques à la région, le Sertão brésilien serait propice à l'implantation de la phytoremédiation chez les petits et moyens propriétaires de terres. Cependant, certaines limites et contraintes avec lesquelles les utilisateurs de la phytoremédiation doivent composer restent à être considérées. En fait, la décontamination des pesticides reste une voie à explorer, bien que des études soient prometteuses. En ce qui concerne la salinisation, des projets devraient aller de l'avant, car de nombreuses informations sont déjà disponibles.

Les recommandations émergentes de ce travail suggèrent de poursuivre les recherches et l'éducation dans le domaine de la phytoremédiation en sol semi-aride brésilien ainsi que de créer des réseaux entre agriculteurs, experts et subventionnaires. De plus, en promouvant de nouvelles formes de pratiques agricoles qui sont respectueuses de l'environnement, comme avec l'agriculture biologique et en s'attaquant directement à la source du problème la dégradation des sols pourrait être ralentie. Enfin, l'implication du gouvernement par l'établissement de politiques publiques et de règles plus strictes devrait encourager les bonnes pratiques de gestion des terres.

## **Remerciements**

Je souhaite remercier mon directeur d'essai qui a révisé mon document et proposé les corrections nécessaires, ainsi que Caroline Cloutier, la coordonnatrice de programme qui m'a guidé dans la planification et les détails de l'élaboration du projet.

Un merci spécial à tous les gens que j'ai croisés lors de mon séjour dans le Nord-est du Brésil et qui m'ont informé sur les problématiques environnementales et sociales, car c'est à la suite de toutes ces discussions que j'ai eu l'idée de travailler sur la région semi-aride du pays.

Également, je souhaite remercier les étudiants de la MEI avec qui j'ai partagé les joies et les embûches tout au long de cette formation académique. Merci aussi à tous ceux qui m'ont accueilli, soutenu, donné des idées, relu et encouragé.

En espérant que l'amalgame de toutes ces informations permettra d'améliorer la problématique des sols au Brésil, de donner des idées à d'autres pour la continuité de ce travail ou encore de permettre la réflexion sur les enjeux actuels mondiaux.

## Table des matières

INTRODUCTION.....	11
CHAPITRE 1 - Présentation du Sertão: contexte historique, social et environnemental.....	13
1.1 Présentation de la région .....	13
1.1.1 Origine du mot.....	13
1.1.2 Formation de la région et types de sols .....	14
1.1.3 Climat .....	17
1.1.4 Hydrologie.....	18
1.1.5 Végétation .....	18
1.1.6 Biodiversité .....	19
1.2 Caractéristiques sociales.....	20
1.2.1 Démographie .....	20
1.2.2 Occupation et division des terres.....	21
1.2.3 Diversité ethnique.....	22
1.2.4 Éducation.....	22
1.2.5 Emplois et revenu domiciliaire.....	23
1.2.6 Activités économiques .....	24
1.3 Utilisation des produits phytosanitaires.....	26
1.3.1 Types de produits phytosanitaires .....	28
1.3.2 Persistance dans l'environnement .....	29
1.3.3 Impacts sur la santé humaine et l'environnement .....	31
1.4 Processus de salinisation .....	31
1.4.1 Impacts de la salinisation.....	34
CHAPITRE 2 - Portrait de la phytoremédiation et son application .....	37
2.1 Définition de la phytoremédiation.....	37
2.2.2 Phytodégradation.....	41
2.2.3 Rizodégradation.....	41
2.2.4 Phytovolatilisation.....	42
2.2.5 Phytostabilisation .....	42
2.2.6 Rizofiltration .....	42
2.3 Avantages .....	43
2.4 Limites.....	44
2.5 Caractéristiques et fonctions des plantes optimales.....	45
2.6 Plantes natives, exotiques et modifiées .....	45

2.7	La phytoremédiation au Brésil .....	48
2.7.1	Phytoremédiation des sols contaminés aux pesticides .....	48
2.7.2	Phytoremédiation des sols contaminés par la salinisation.....	52
CHAPITRE 3 - Analyse de faisabilité pour l'implantation de la phytoremédiation dans le Sertão.....		56
3.1	Analyses de faisabilités .....	56
3.1.1	Analyse technique .....	56
3.1.2	Analyse organisationnelle .....	59
3.1.3	Analyse financière.....	62
3.1.4	Analyse légale .....	65
3.1.5	Analyse sociale et environnementale .....	68
3.2	Recommandations et perspectives.....	70
CONCLUSION .....		74
RÉFÉRENCES.....		76

### **Liste des figures et tableaux**

Figure 1.1	Régions du Nord-est du Brésil et ses divisions.....	14
Figure 1.2	Relief et formation rocheuse de la région du Nord-est du Brésil .....	15
Figure 1.3	Types de sols de la région du Nord-est du Brésil .....	15
Figure 1.4	Processus naturels de salinisation le plus fréquent dans la zone semi-aride au Brésil .....	32
Figure 1.5	Processus naturels de salinisation dans la zone semi-aride au Brésil .....	33
Figure 2.1	Mécanismes impliqués dans la phytoremédiation .....	40
Tableau 2.1	Mécanismes de la phytoremédiation et types de contaminants pouvant être traités.....	43
Tableau 2.2	Espèces de plantes et pesticides associés qui peuvent être décontaminés .....	52
Tableau 3.1	Dépenses possibles à être considérées pour un projet en phytoremédiation.....	63

## Lexique

<b>Agriculture familiale</b>	Type d'agriculture où le travail est essentiellement réalisé par les membres de la famille et les revenus proviennent majoritairement de l'exploitation familiale.
<b>Agriculture de subsistance</b>	Type d'agriculture qui se concentre dans la production d'aliments pour subvenir aux besoins de l'agriculteur et de sa famille et qui a peu de ressources à vendre.
<b>Analyse de faisabilité</b>	Étude permettant de déterminer que le projet qui souhaite être réalisé est viable d'un point de vue financier, technique, social organisationnel, etc.
<b>Bioremédiation</b>	Processus ou technique de décontamination de sites pollués par des organismes vivants.
<b>Caatinga</b>	Forêt tropicale sèche localisée dans le Nord-est du Brésil et caractérisée par son climat semi-aride.
<b>Chapada</b>	Formation géologique isolée du paysage ayant une élévation de plus de 600 mètres et une partie plane à son sommet.
<b>Contaminant</b>	Élément, qui peut être une matière solide, liquide, gazeuse, une radiation, un son, une vibration, une chaleur ou une odeur, susceptible de nuire à la santé des êtres vivants ou d'altérer la qualité de l'environnement.
<b>El Niño</b>	Phénomène climatique causant une hausse des températures de l'eau dans l'océan Indien et ayant des répercussions mondiales comme des sécheresses prolongées dans le Nord-est du Brésil.
<b>Demie-vie d'une substance</b>	Temps nécessaire après l'application, pour qu'une substance réduise sa concentration de moitié, indépendamment de sa concentration initiale dans l'environnement.
<b>Désertification</b>	Processus de transformation progressive d'une zone aride ou semi-aride en désert à la suite d'un manque prolongé de précipitations et/ou d'une mauvaise gestion des sols.
<b>Dessalinisateur</b>	Appareil permettant de retirer le sel de l'eau.
<b>Érosion</b>	Processus de dégradation et de déplacement des sols et des roches qui est causé par les phénomènes atmosphériques et climatiques, de l'action de l'eau et des activités anthropiques.
<b>Espèce glicophyte</b>	Espèce peu tolérante aux actions des sels sur leur métabolisme.
<b>Espèce xérophile</b>	Espèce ayant des adaptations lui permettant de vivre dans les milieux arides.

<b><i>Inselberg</i></b>	Relief résiduel rocheux et escarpé.
<b><i>La Niña</i></b>	Phénomène climatique causant des baisses de températures à la surface de l'eau dans l'océan Pacifique et ayant des répercussions mondiales comme des conditions plus sèches que la normale.
<b>Lessivage</b>	Transport des particules du sol (argile, ions, produits phytosanitaires) par l'eau en direction de la nappe phréatique.
<b>Nappe phréatique</b>	Nappe d'eau souterraine d'un aquifère qui est localisé à une faible profondeur sous une couche de sol poreux et qui est constamment alimentée de manière naturelle.
<b>Nord-est</b>	Une des régions administratives du Brésil.
<b><i>Pardo</i></b>	Descendants européens du Brésil.
<b>Pesticide</b>	Toute substance ou mélange de substances chimiques ou biologiques ayant comme effet de repousser, détruire, sinon de contrôler les espèces ravageuses ou encore réguler la croissance des végétaux. Désigne les produits phytosanitaires.
<b>Phytoremédiation</b>	Terme désignant les nombreuses voies par lesquelles les plantes peuvent remédier des sites contaminés par les polluants organiques et inorganiques présents dans le sol et les eaux.
<b>Polluant</b>	Substance ou processus physique, chimique ou biologique qui dégrade un milieu donné et provoque une nuisance ou une contamination.
<b>Produit phytosanitaire</b>	Substances ou préparations chimiques ou biologiques qui servent à prévenir, repousser ou détruire divers organismes vivants nuisibles aux plantes et à la production agricole.
<b><i>Quilombola</i></b>	Descendants des esclaves Afro-brésilien et vivant dans les Quilombos.
<b>Salinisation</b>	Accumulation excessive de sels solubles dans le sol et qui est causée par l'évaporation excessive de l'eau et les activités anthropiques comme l'irrigation.
<b>Semi-aride</b>	Zone délimitée située majoritairement dans le Nord-est du Brésil et possédant un climat du même type.
<b><i>Sertão</i></b>	Vaste région du Nord-est du Brésil qualifiée par son climat semi-aride et sa culture typique.
<b><i>Sesmarias</i></b>	Concessions de terres
<b>Sol précambrien</b>	Type de sol créé lors de l'ère précambrienne.

<b>Système agropastoral</b>	Système qui jumelle à la fois l'agriculture et l'élevage du bétail.
<b>Organophosphate</b>	Produit de synthèse faisant partie des composés organophosphorés et utilisé comme pesticide.
<b>Carbamate</b>	Produit utilisé comme pesticide.
<b>Acide phénoxyacétique</b>	Produit de synthèse utilisé comme pesticide.
<b>Pyréthroïde</b>	Produit de synthèse appartenant au groupe des composés organochlorés et étant utilisé principalement comme insecticide.
<b>Organochloré</b>	Produit de synthèse dérivé du chlore et ayant plusieurs utilités dont celui d'être employé comme pesticide.



## Liste des symboles, sigles et acronymes

ADAO	Association pour le Développement de l'Agriculture Biologique (Traduction libre de: <i>Associação para o Desenvolvimento da Agropecuária Orgânica</i> )
BNB	Banque du Nord-est (Traduction libre de: <i>Banco do Nordeste</i> )
BNDES	Banque Nationale pour le Développement Économique et Social (Traduction libre de: <i>Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social</i> )
CAPESA	Coopérative Agricole du Seridó (Traduction libre de: <i>Cooperativa Agropecuária do Seridó</i> )
CNPq	Conseil National pour le Développement Scientifique et Technologique (Traduction libre de: <i>Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico</i> )
CONGEA	Congrès Brésilien de Gestion de l'Environnement (Traduction libre de: <i>Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental</i> )
CONAMA	Conseil national d'environnement (Traduction libre de: <i>Conselho Nacional Do Meio Ambiente</i> )
CONIDIS	Congrès International sur la Diversité du Semi-aride (Traduction libre de: <i>Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido</i> )
DDD	Dichlorodiphényldichloroéthane
DDE	Dichlorodiphényldichloroéthylène
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
Embrapa	Société brésilienne de recherche agricole dans le semi-aride (Traduction libre de: <i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Semi-Árido</i> )
EMATER	Société d'Assistance Technique et d'Extension Rural (Traduction libre de: <i>Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural</i> )
EPA	Agence américaine de protection de l'environnement (Traduction libre de: <i>United States Environmental Protection Agency</i> )
FCO	Fonds Constitutionnel pour le Nord-est (Traduction libre de: <i>Fundo Constitucional de Financiamento do Centro-Oeste</i> )
FNE	Fonds Constitutionnel pour le Nord-est (Traduction libre de: <i>Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste</i> )

FNO	Fonds Constitutionnel pour le Nord-est (Traduction libre de: <i>Fundo Constitucional de Financiamento do Norte</i> )
HCH	Hexachlorocyclohexane
INSA	Institut National du Semi-aride (Traduction libre de: <i>Instituto Nacional do Semiárido</i> )
MAPA	Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de l'approvisionnement alimentaire (Traduction libre de: <i>Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento</i> )
MMA	Ministère de l'Environnement (Traduction libre de: <i>Ministério do Meio Ambiente</i> )
OGM	Organismes génétiquement modifiés
PARA	Programme d'analyse des résidus des produits agrochimiques pour l'alimentation (Traduction libre de: <i>Programa de Analise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos</i> )
PIB	Produit Intérieur Brut
PNPB	Programme national de production et d'utilisation du biodiesel (Traduction libre de: <i>Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel</i> )
PROAGRO	Programme d'assurance agricole et d'élevage (Traduction libre de: <i>Programa de Garantia da Atividade Agropecuária</i> )
Pronaf	Programme national de renforcement de l'agriculture familiale (Traduction libre de: <i>Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar</i> )
PSR	Programme de subvention aux primes d'assurance (Traduction libre de: <i>Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro</i> )
RNCS	Réunion du Nord-est de la Science du Sol (Traduction libre de: <i>Reunião Nordestina de Ciência do Solo</i> )
STR	Syndicats des travailleurs ruraux (Traduction libre de: <i>Sindicatos de Trabalhadores Rurais</i> )
STTR	Syndicats des travailleurs ruraux et de l'agriculture familiale (Traduction libre de: <i>Sindicato dos Trabalhadores Rurais e da Agricultura Familiar</i> )

## Introduction

La contamination des sols par un éventail de substances est présente tout autour du globe. Elle a des conséquences non négligeables sur le bien-être et la santé humaine, ainsi que sur le bon fonctionnement des écosystèmes. Il y aurait environ un tiers des sols du monde qui seraient dégradés à cause de leur mauvaise gestion et chaque année, ce serait des dizaines de milliards de tonnes de sols supplémentaires qui seraient perdus (FAO, 2017).

Au début des années 1960, le développement agricole des pays émergents qui se trouvent en Amérique latine et en Asie s'accroît : c'est l'époque de la Révolution verte (Evenson & Gollin, 2003). Elle est encouragée par l'utilisation de variétés sélectionnées, d'engrais, de pesticides, de l'irrigation des terres et de la mécanisation (Caron & Sabourin, 2001). Le Brésil n'échappe pas à cet engouement qui se donne comme objectif d'intensifier sa production agricole (MMA, s.d.). Il en résulte qu'en 2000, le pays occupe le sixième rang des plus gros exportateurs agricoles mondiaux, tandis qu'en 2009, il se glisse à la troisième place, juste après les États-Unis et l'Union européenne (IBAMA, 2010). De plus, le pays devient, en 2008, le plus grand consommateur de pesticides au monde (IBAMA, 2010). Les produits agrochimiques captent l'attention des scientifiques et du public lorsque des problèmes environnementaux et de santé font massivement surface (Londres, 2011). L'irrigation intensive, pour sa part, a engendré ou accéléré les processus de salinisation des terres, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où les taux d'évaporation sont élevés et les précipitations sont faibles (Embrapa, 2001). L'irrigation pouvant entraîner la désertification et l'abandon des terres qui est alors inévitable (Suassuna, 2002).

Face à la situation actuelle, des solutions, comme le développement d'approches vertes et accessibles pour lutter contre la pollution des sols et du même coup de la dégradation des terres voient le jour peu à peu avec l'avancement des nouvelles technologies. C'est le cas notamment de la phytoremédiation, qui bien qu'elle soit un processus simple qui n'utilise que le cycle de vie des plantes, n'a été popularisée qu'au début des années 1990 (Cuuningham *et al.*, 1997). Elle a comme principe que certaines plantes peuvent retirer, mobiliser, séquestrer ou détruire des substances organiques ou inorganiques du sol en utilisant leur processus physiologique (Cuuningham & Ow, 1996).

La zone semi-aride, le Sertão, située dans le Nord-est du Brésil est la région la plus pauvre du pays (Sampaio & Batista, 2004). Elle est affectée par les problèmes de contamination des terres, dont ceux nommés précédemment : pesticides et salinisation (Sampaio & Batista, 2004). Étant donné que ce sont les petits producteurs familiaux qui dominent la région (Lira *et al.*, 2005), l'implantation d'une telle technique dans cette même région pourrait améliorer les conditions de vie des habitants et entraîner une meilleure

gestion des terres. C'est pourquoi ce travail a comme objectif principal de déterminer si les techniques de phytoremédiation sont applicables en sol semi-aride brésilien chez les propriétaires de petites et moyennes terres, tout en considérant les aspects environnementaux et sociaux ainsi que les ressources disponibles.

Pour répondre à cet objectif, le travail est divisé en trois parties. D'abord, le premier chapitre aborde principalement les caractéristiques de la région à l'étude: le Sertão brésilien. Il permet d'implanter la base dans laquelle le projet s'inscrit et il souhaite faire comprendre au lecteur les différents aspects qui influencent et dictent la tonalité du travail. Les caractéristiques physiques, écologiques, historiques, sociales et environnementales sont abordées avant d'être plus précis sur les enjeux sociaux et environnementaux présents dans la région. Ces derniers relatent précisément la problématique de l'utilisation des produits phytosanitaires dans le Sertão, qui contaminent les terres et les cultures avec des intrants chimiques pouvant être persistants dans l'environnement et de ce fait, avoir des conséquences négatives sur la santé humaine et l'environnement. En seconde partie, la problématique de la salinisation des terres y est traitée; résultat de l'accélération des processus naturels, créée par l'irrigation intensive dans la région semi-aride. Les impacts de cette problématique concernant l'environnement et les répercussions sociales y sont également détaillés ainsi que les conséquences directes de l'utilisation des terres sur le territoire.

Le deuxième chapitre décrit en détail ce qu'est la phytoremédiation, une technique utilisée ailleurs dans le monde et est émergente au Brésil. Son principe, son fonctionnement, ses avantages et ses limites sont décrits, ainsi que les avancées technologiques la concernant. De plus, ce chapitre relate les études qui ont déjà été réalisées dans le Nord-est du Brésil qui concernent la phytoremédiation et qui peuvent servir de lignes directrices quant aux conditions physico-chimiques optimales nécessaires et aux plantes potentiellement utilisables dans cette même région.

Finalement, le troisième chapitre analyse, à travers plusieurs études de faisabilité, les composants spécifiques au Sertão dans l'optique d'implanter la phytoremédiation dans cette région et particulièrement chez les propriétaires et les agriculteurs de petites et moyennes terres. Plusieurs sphères sont abordées dont les aspects techniques, organisationnels, financiers, légaux, sociaux et environnementaux qui concernent la mise en place de cette technique et les défis auxquels les habitants font face. Ainsi, suite à cette analyse et en prenant compte des aspects traités aux chapitres précédents, des recommandations sont proposées dans le but de favoriser un meilleur environnement technique pour les propriétaires de terres qui souhaiteraient aller de l'avant avec la phytoremédiation. Ceci pourrait alors permettre son implantation dans le Sertão de manière durable.

# Chapitre 1

## Présentation du Sertão: Contexte historique, social et environnemental

L'importance de situer le contexte social et environnemental de la région du Sertão est nécessaire pour bien comprendre dans quel environnement et dans quelles conditions les techniques de phytoremédiation pourraient être implantées chez les propriétaires de terres. C'est donc dans cette optique que les particularités de cette région sont présentées. L'emphase est mise sur les caractéristiques influençant de manière significative l'application de la phytoremédiation.

### 1.1 Présentation de la région

Le Sertão est géographiquement décrit comme une zone située dans une des cinq régions du Brésil, soit le Nord-est (Figure 1a), c'est aussi le nom donné à la région semi-aride (Figure 1b) (Sabourin & Caron, 2001). Elle est un vaste territoire principalement rural et éloigné des centres urbains (Filho, 2011). Le Sertão est une zone semi-aride décrite comme la plus grande d'Amérique latine, avec près d'un million de km<sup>2</sup> (Batista & Campos, 2017) et la plus peuplée au monde, avec plus de vingt millions d'habitants (Filho, 2011; Burney *et al.*, 2014; INSA, 2014). La zone de l'Agreste, qui se trouve à l'est et celle du Meio-Norte qui se trouve à l'ouest entourent le Sertão. De plus, il s'étend sur huit des neuf états de la région du Nord-est: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe et Bahia (Maranhão étant l'exception). La grande majorité du Sertão se trouve sur le territoire des états de Bahia, Pernambuco et Paraíba.

La colonisation, par les Portugais, a débuté durant la deuxième partie du 16<sup>e</sup> siècle (Andrade, 1989). Cependant, de nombreux groupes autochtones occupaient déjà le territoire, même que des relevés archéologiques ont établi la présence humaine remontant à près de cinquante mille ans (Etchevarne, 2000).

#### 1.1.1 Origine du mot

L'origine du mot Sertão proviendrait de plusieurs sources (Filho, 2011). Les Portugais utilisaient le mot « desertão » (grand désert – du latin *desertus*) pour désigner les régions qui étaient peu peuplées de l'Afrique-Équatoriale, ce qui aurait pu dériver à la formation du mot Sertão connu aujourd'hui au Brésil. Le mot « certão » pourrait également être à l'origine du mot, car au 16<sup>e</sup> siècle il était utilisé pour désigner les régions intérieures du Portugal (Filho, 2011). Quant au mot « muceltão », abrégé en « certão », qui aurait comme signification latine *locus mediterraneus*, ce qui signifie les terres éloignées de la côte aurait

également pu être à l'origine du mot Sertão. Enfin, toutes les hypothèses entourant son origine convergent vers un sens commun qui est celui de continent ou terres intérieures (Filho, 2011).

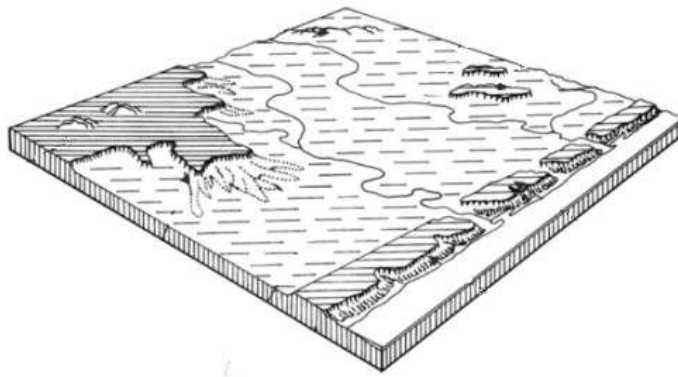


**Figure 1.1 Régions du Nord-est du Brésil et ses divisions** a) Divisions des sous-régions du Nord-est du Brésil b) Délimitation de la zone semi-aride en 2018

Modifié de : a) Cerqueira (2010) b) LAPIS (2017)  
Traduction libre

### 1.1.2 Formation de la région et types de sols

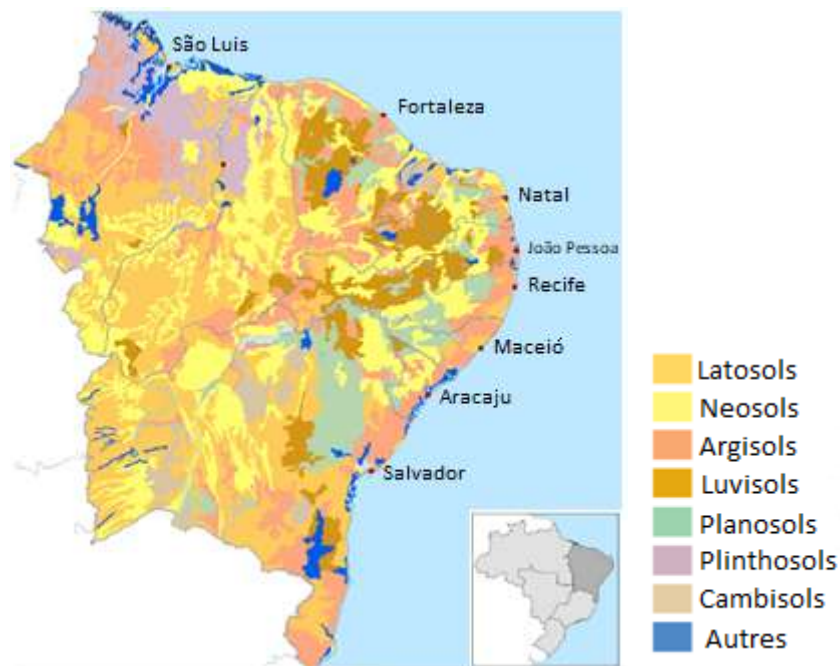
Le Sertão est formé sur un socle précambrien et le paysage est composé de vallées légèrement ondulées, dominé à plusieurs endroits par des *inselbergs* et des plaines (Cadier, 1994). Il est en grande partie localisé dans des dépressions entourées par des plateaux et *chapadas* (Major *et al.*, 2004) (Figure 1.2). L'altitude moyenne varie entre 400 mètres et 500 mètres, mais peut atteindre un peu plus de 1 000 mètres à certains endroits, comme sur le plateau de Borborema, localisé dans la partie orientale du Nord-est (Cunha *et al.*, 2010). La région est soumise à des processus d'érosion, dont l'exfoliation millimétrique qui produit le sable qui sculpte les plaines et l'exfoliation métrique qui crée les grandes roches retrouvées aux pieds des *inselbergs* et des monts (Prado, 2003).



**Figure 1.2 Relief et formation rocheuse de la région du Nord-est du Brésil**

Source : Prado (2003)

Les *chapadas* sont composées de roche sédimentaire (Cadier, 1994) et le reste du territoire principalement de roche cristalline, même qu'à certains endroits, il y a recouvrement de la zone cristalline par des couches sédimentaires. De plus, plusieurs types de sols façonnent le Sertão, créant une diversité présentée à la figure 1.3. Les sols du Brésil sont qualifiés et catégorisés par le *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (SiBCS) (Embrapa, 2013).



**Figure 1.3 Types de sols de la région du Nord-est du Brésil**

Modifié de : Marques *et al.* (2014)  
Traduction libre

En général, les sols de la région semi-aride sont peu développés, considérant la faible quantité d'eau qui s'y trouve. La matière organique décomposée est peu incorporée au sol, car elle est rapidement transportée

par le vent. L'érosion y est importante et les minéraux primaires présentent un faible degré d'altération (Santos, 2017). À plusieurs endroits, il est possible de rencontrer des sols sableux et profonds qui se retrouvent à proximité de sols argileux peu profonds (Santos, 2017).

D'abord, les Latosols jaunes, orangés et rouges sont ceux qui détiennent la plus grande superficie dans la zone semi-aride. Ils peuvent être profonds à très profonds, c'est-à-dire de 100 cm à plus de 200 cm. La texture est variable, mais généralement assez poreuse. L'érosion affecte peu ces sols, principalement ceux de texture plus argileuse, car ils se rencontrent majoritairement dans les environnements plats ou peu vallonnés. Cependant, la fertilité naturelle de ces sols est faible, car la disponibilité des nutriments y est également faible pour les plantes et son acidité y est élevée, avec un pH de moins de 4,3 (Araújo Filho, 2011; Santos, 2017).

La seconde catégorie la plus représentée dans la région est les Neosols Litoliques. Au contraire des Latosols, ces sols sont peu profonds, c'est-à-dire de moins de 50 cm à 100 cm. L'aspect est généralement rocheux ou pierreux, avec une présence fréquente d'affleurements de roche. La texture est moyenne (composition granulométrique de moins de 35 % d'argile et plus de 15 % de sable) et la capacité de rétention d'eau y est faible (Araújo Filho, 2011). L'érosion est forte, car les sols sont principalement localisés dans des reliefs accidentés (Cunha *et al.*, 2010). Enfin, ils se prêtent mal à des cultures intensives (Santos, 2017).

Les Argisols sont le troisième groupe de sols le plus fréquent dans la région. Ils ont une profondeur variable, de plus de 50 cm à moins de 200 cm, où en profondeur, il y a présence d'argile. Celle-ci favorise l'érosion et encore plus aux endroits où il y a beaucoup de mouvements. L'intérieur et la surface de ces sols sont souvent pierreux ou présentent des concrétions ferrugineuses et de ciment naturel. Ces caractéristiques rendent alors les sols peu perméables à l'eau. De plus, ils sont peu fertiles et acides, mais ils sont fortement utilisés dans l'agriculture irriguée. Les poches d'eau qui sont formées à la suite du drainage contribuent à la salinisation des sols (Santos, 2017). La salinisation des sols sera vue à la fin du chapitre.

Les Luvisols sont peu profonds (moins de 50 cm à 100 cm) et contiennent de l'argile dans les couches sous la surface. L'argile confère au sol une bonne rétention des éléments, dont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium et dans une moindre mesure, l'aluminium et l'hydrogène (Santos, 2017). Ceci fait des Luvisols des sols fertiles peu acides à neutres, avec des pH allant de 5,4 à 7,3. Ils sont surtout retrouvés dans les environnements plats et peu vallonnés. Par contre, ils peuvent être assez pierreux et présenter, dans les couches en superficie, une dureté extrême. Ils sont aussi hautement soumis à la dégradation et à l'érosion, même qu'à de nombreux endroits, ils sont tant altérés que leur classification en



est difficile, voire impossible. Enfin, de même que pour les Argisols, la salinisation de ces sols y est fréquente (Araújo Filho, 2011; Santos, 2017).

Les Neosols Quartzareniques qui occupent environ 9 % de la région sont des sols profonds à très profonds (de 100 cm à plus de 200 cm) qui se retrouvent sur des surfaces planes et peu vallonnées (Santos, 2017). La texture est sableuse et ils sont constitués de 95 % et plus de minéraux comme le quartz, la calcédoine et l'opale (Santos, 2017). L'acidité y est importante (pH de moins de 5,3) et leur capacité d'emmagasinier l'eau et les nutriments est faible, ce qui est en fait des sols peu fertiles (Araújo Filho, 2011). Cependant, l'infiltration élevée en eau les rend peu susceptibles aux processus d'érosion (Ribeiro *et al.*, 2009).

Les Planosols Hapliques occupant eux aussi environ 9 % du territoire sont des sols très variables avec une acidité modérée à neutre avec un pH entre 5,4 à 7,3 (Santos, 2017). La présence de sodium rend le sol alcalin et peut créer des problèmes de dispersion de l'argile, ce qui forme un endurcissement à certains endroits, avec une diminution de la perméabilité et de la porosité. Ils sont extrêmement sujets à l'érosion, mais la fertilité des sols reste variable, dépendant du matériel d'origine du sol (Santos, 2017).

Finalement, encore d'autres types de sols sont présents dans la région semi-aride et chacun occupe moins de 5 % du territoire. Ils sont nommés Neosols Regolithiques, Cambisols, Neosols Fluvial, Planosols Natriques, Vertisols, Chernozems Rendziques, Gleysols Salicyliques, et Plinthosols (Santos, 2017).

### **1.1.3 Climat**

Le climat dominant du Sertão est de type semi-aride, c'est-à-dire un climat chaud où les températures moyennes varient de 20 °C à 26 °C selon l'altitude. À certains endroits, comme l'intérieur des vallées des états de Piauí, Ceará, Paraíba et Rio Grande do Norte, les températures maximales moyennes peuvent dépasser 36 °C (Nimer, 1972). De plus, la température est corrélée avec l'altitude; elle diminue lorsque l'altitude augmente, et ceci est également vrai pour les précipitations qui sont plus abondantes à des altitudes plus élevées (Araújo *et al.*, 2005).

La période de pluie abondante de la majorité du Sertão est relativement faible, elle dure environ trois mois et se produit généralement entre mars et juillet, selon la région (Nimer, 1972). Les précipitations qui sont distribuées de manières irrégulières sur le territoire ne dépassent pas 1 000 mm de pluie en moyenne annuellement et la moitié du territoire reçoit des pluies inférieures à 750 mm par an (Nimer, 1972). À certains endroits, comme c'est le cas au *Raso da Catarina*, localisé entre les états de Bahia et Pernambuco, ainsi que de la *Depressão de Patos* dans l'état de Paraíba, les pluies sont de moins de 500 mm durant l'année (Nimer, 1972). C'est également à ces endroits que la période de sécheresse est la plus longue et peut atteindre 10 à 11 mois. Généralement, la période de sécheresse augmente vers l'intérieur des terres,

où à la périphérie elle dure en moyenne trois à cinq mois. À certains endroits, comme dans les milieux les plus arides de la Caatinga, l'évaporation peut être plus importante que la quantité d'eau reçue annuellement (Ross, 2005). Les périodes de sécheresse peuvent également persister plusieurs années (Nimer, 1972).

Depuis le 16<sup>e</sup> siècle, plus d'une cinquantaine de sécheresses ont été enregistrées dans le Nord-est (Melo, 1999). Quant à la dernière longue sécheresse, elle s'est déroulée de 2010 à 2016 (Marengo *et al.*, 2017). Ces événements sont souvent entraînés par le phénomène El Niño qui réduit les précipitations dans le Nord-est du Brésil et cause les épisodes exceptionnels de sécheresses. Cependant, ce ne sont pas toutes les années El Niño qui occasionnent des sécheresses et celles-ci ne sont pas toutes produites lors des années El Niño. La sécheresse de 2011 à 2012, par exemple, a eu lieu durant une année La Nina (Rodrigues & McPhaden, 2014).

#### **1.1.4 Hydrologie**

Le Sertão s'insère sur plusieurs bassins hydrologiques brésiliens: Rio São Francisco, Rio Parnaíba, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental et Atlântico Leste, qui à leur tour se composent de bassins hydrologiques secondaires (Rocha *et al.*, 2011). Les cours d'eau qui traversent la région sont majoritairement intermittents à cause du climat semi-aride qui les assèche une partie de l'année. Ils sont uniquement alimentés au cours de la saison des pluies (Etchevarne, 2000).

Le Rio São Francisco est le troisième plus grand cours d'eau du Brésil et le plus important du Nord-est. Il a une longueur de 2 700 km et son bassin versant à une superficie de 645 067,20 km<sup>2</sup>. Il traverse les états du Minas Gerais et de Bahia, sert de frontière entre les états de Bahia et du Pernambuco et à l'embouchure à ceux de Sergipe et d'Alagoas (Kohler, 2003). Il s'agit du seul cours d'eau qui perdure toute l'année, malgré tout, une grande quantité d'eau s'évapore lorsqu'il traverse la région semi-aride. L'eau de ce bassin versant est utilisée en agriculture et dans la production d'énergie, où parfois les ressources sont manquantes (Neto *et al.*, 2003). De plus, d'autres cours d'eau plus petits, dont le Rio Pajeú, localisé dans l'état du Pernambuco et faisant 353 km se jettent dans celui-ci (Neto *et al.*, 2003). Le Rio Pajeú maintient son eau durant une assez longue période de l'année, ce qui est profitable aux régions à proximité (Etchevarne, 2000). Enfin, même si les cours d'eau s'assèchent durant une période de l'année, l'eau y est toujours présente sous la surface et par conséquent peut être exploitée.

#### **1.1.5 Végétation**

La Caatinga est la végétation et le biome qui compose presque tout le Sertão et est caractérisée par une forêt tropicale sèche. Elle s'étend sur 844 453 km<sup>2</sup>, soit les trois quarts de la région du Nord-est du Brésil

(IBGE, 2004; Leprun, 1994). La Caatinga comprend plusieurs domaines de végétation, qui contiennent majoritairement des espèces xérophiles (Major *et al.*, 2004). Elle est caractérisée par des végétaux caducs, épineux et succulents (Araújo, 2007; Bétard, 2011; Loiola *et al.*, 2012). Des forêts arborescentes composées d'arbres de grande, moyenne ou petite taille, des arbustes densément peuplés ou ouverts et des herbacées se retrouvent dans le biome (Drumond *et al.*, 2000; Major *et al.*, 2004).

Plus précisément, la Caatinga se compose de plusieurs types qui sont définis par la composition floristique, la présence d'arbres, la taille des arbustes, ainsi que leur densité. D'abord, la Caatinga de type *agupada* est caractérisée par de nombreux *Cactaceae* et *Bromeliaceae* et la strate végétale est basse, tandis que la Caatinga *densa* qui contient également des *Cactaceae* et *Bromeliaceae* se définit comme une formation compacte à deux strates, soit une première de deux à trois mètres de haut et une seconde de cinq à six mètres de haut. Pour sa part, la Caatinga *arbustiva con succulentes* est une strate végétale de quatre à cinq mètres de haut, où il y a une forte présence de *Cactaceae*. Le type *arbustiva esparsa* contient peu d'arbres et atteint environ deux mètres de haut. Enfin, la Caatinga dite *arborea* est dominée par des arbres de huit à douze mètres. Cette dernière caractérise la transition vers la région de l'Agreste. L'hétérogénéité de la végétation dans le Sertão est influencée par les différents types de sols, les variations topographiques et le climat qui le compose (Drumond *et al.*, 2000). Les plantes sont adaptées pour survivre aux conditions extrêmes du biome. En effet, de nombreuses espèces perdent leurs feuilles durant la saison sèche pour éviter la perte de trop grande quantité d'eau. Les *Cactaceae* conservent l'eau dans leurs tissus, tandis que d'autres espèces comme *Spondias tuberosa*, a des organes sous-terrain de réserve.

Les familles les plus fréquentes sont les *Fabaceae*, *Euphorbiaceae* et *Cactaceae* (Drumond *et al.*, 2000). Les espèces typiques de la Caatinga sont les juremas (*Mimosa* sp.), marmeleiros (*Croton* sp.), mandacarus (*Cereus jamacaru*), xiquexique (*Pilosocereus gounellei*), umbuzeiro (*Spondias tuberosa*), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*), faveleira (*Cnidocolus phyllacanthus*) et pinhao-bravo (*Jatropha mollissima*) (Drumond *et al.*, 2000; Rocha *et al.*, 2011).

#### **1.1.6 Biodiversité**

Le biome de la Caatinga est longtemps resté peu étudié par la communauté scientifique comparativement aux autres biomes comme celui de l'Amazonie qui a reçu plus d'attention (Santos *et al.*, 2011). Les croyances entourant la biodiversité de la Caatinga faisaient de celle-ci un biome pauvre en espèces floristiques et sans espèce endémique (Giulietti *et al.*, 2004). Cependant, depuis les cinquante dernières années, l'intérêt des scientifiques d'étudier la région s'est accru, favorisant l'acquisition de nouvelles connaissances concernant la diversité de la flore et de la faune, modifiant ainsi la perception générale qu'avaient les gens de la Caatinga (Albuquerque *et al.*, 2012).

Les plantes dominent le territoire avec 1 512 espèces végétales recensées (Gariglio *et al.*, 2010), tandis que 510 espèces d'oiseaux (Silva *et al.*, 2003), 240 espèces de poissons (Rosa *et al.*, 2003), 187 espèces d'abeilles (Zanella & Martins, 2003), 167 espèces de reptiles et d'amphibiens (Rodrigues, 2003) et 148 espèces de mammifères (Oliveira *et al.*, 2003) peuplent la Caatinga, constituant de cette manière la grande biodiversité unique de la région. De plus, le taux des espèces endémiques serait élevé (Leal *et al.*, 2005). Il y aurait, par exemple, 318 espèces végétales endémiques, considérant seulement les espèces ligneuses et succulentes (Giulietti *et al.*, 2004). Néanmoins, il y aurait une sous-représentation de la biodiversité réelle présente dans la Caatinga. Le nombre d'espèces serait possiblement plus important que ce qui est décrit dans la littérature (Leal *et al.*, 2005). En fait, de nombreux endroits n'auraient pas été recensés. C'est le cas notamment des plantes ligneuses pour lesquels 41,1 % de l'ensemble de la Caatinga n'ont pas été échantillonné et 40,0 % de la région n'auraient reçu qu'une à dix collectes par 1,6000 km<sup>2</sup> (Tabarelli & Vicente, 2004). Enfin, de nombreuses espèces sont une préoccupation particulière, car elles sont menacées d'extinction ou en diminution (Leal *et al.*, 2005). Les causes de ces diminutions sont nombreuses, dont la perte d'habitat causée par la déforestation ou encore l'exploitation directe des espèces par les humains (Leal *et al.*, 2005).

## **1.2 Caractéristiques sociales**

Les conditions biophysiques du Sertão définissent la manière dont les habitants évoluent dans ce paysage. Elles influencent les activités anthropiques et l'organisation spatiale des ceux-ci. L'hétérogénéité des sols, par exemple, influence la disposition des systèmes d'occupation humains et l'utilisation qui en est faite (Silva & Filho, 2006). La population doit s'ajuster devant les différentes contraintes dont elle fait face durant l'année. Les épisodes de sécheresses ont une influence directe sur la production agricole et des conséquences d'ordre économique et social peuvent avoir lieu (Silva & Filho, 2006).

Justement, les activités économiques durables sont peu soutenables dans la région semi-aride à cause de cette condition et en général, les conditions de vie sont difficiles. En fait, la région est considérée comme la plus pauvre du Brésil (Sampaio & Batista, 2004). D'ailleurs, sur les 500 municipalités qui ont les plus faibles indices de développement humain du pays, près de la moitié, soit 47,5 %, sont situées dans la région semi-aride (Silva & Filho, 2006).

### **1.2.1 Démographie**

La zone semi-aride, soit pratiquement tout le Sertão, compte un peu plus de 23 millions d'habitants (42 % de la population du Nord-est – la majorité des habitants du Nord-est vivant dans les grandes métropoles près du littoral), c'est-à-dire environ 12 % de la population totale du pays (INSA, 2014). Il a été calculé, dans les limites de la Caatinga, que seulement 15 municipalités ont une densité populationnelle au-dessus

de cent habitants par km<sup>2</sup> et pour la majorité des autres municipalités, il y a moins de 50 habitants par km<sup>2</sup> (Sampaio & Batista, 2004). Ainsi, malgré le grand nombre de personnes, la densité reste peu élevée.

Pour ce qui est de la longévité dans les états peuplant le territoire du Sertão, en 2015, les habitants avaient une espérance de vie à la naissance oscillant entre 70,9 ans dans l'état de Piau, le second état avec les valeurs les plus faibles au pays et 75,5 ans dans l'état du Rio Grande do Norte (IBGE, 2016). Ainsi, l'espérance de vie au Sertão était en dessous de la moyenne brésilienne, se situant à 75,5 ans (IBGE, 2016).

En 2010, 15,6 % des personnes nées dans la région du Nord-est vivaient dans une autre région du pays, faisant ainsi du Nord-est la région où l'émigration est la plus forte au pays; la sécheresse étant une des principales causes à cet exode (Ojima & Fusco, 2014). D'autres raisons, comme la stagnation économique, poussent les gens à émigrer dans le but de trouver un travail (Oliveira & Jannuzzi, 2005). Ceci est particulièrement vrai pour les jeunes qui débute sur le marché du travail ou pour ceux qui sont en condition de travailler (Sampaio & Batista, 2004; Oliveira & Jannuzzi, 2005). Les personnes âgées et les enfants restent alors en grande partie dans la région (Sampaio & Batista, 2004).

Entre 2000 et 2010, les taux de mortalité infantile ont grandement diminué dans tout le Brésil et particulièrement dans le Nord-est, avec une diminution de 58,6 %, laissant alors 18,5 % de mortalité (IBGE, 2012). Même scénario avec le taux de fécondité qui est passé de 2,69 à 2,06 enfants, faisant du Nord-est la région où les naissances ont le plus diminué durant cette période (IBGE, 2012).

### **1.2.2 Occupation et division des terres**

Au Brésil, les propriétaires fonciers, soit environ 2 % de la population, possèdent plus de la moitié des terres titrées, le reste est distribué entre les petits et moyens propriétaires de terres. Malgré les récentes transformations de cette réalité dans l'ensemble du pays, la région semi-aride reste celle où il y a eu le moins de changement (Batista & Santos, 2011).

La manière dont les terres sont distribuées et occupées reflète son histoire coloniale et est basée sur un système de grandes propriétés, de production de monoculture et de la privation des droits de la terre à la majorité de la population (Silva *et al.*, 2016a). En fait, après l'arrivée des Portugais, les *sesmarias* (concessions de terres) apparaissent dans la région et sont établies sur les terres indigènes, près des cours d'eau. Elles sont données aux nobles Portugais pour l'agriculture et l'élevage (Caron & Sabourin, 2001). L'occupation des différentes régions du Sertão s'est produite à des moments différents, même que par endroit elle s'est faite à des siècles d'intervalle. La localisation, l'hostilité de la région et les cours d'eau sont des facteurs qui ont limité ou facilité l'accessibilité à ces sites. Ainsi, des groupes autochtones et

*Quilombolas* se sont réfugiés et installés, aux endroits moins fréquentés qui étaient encore peu connus des Européens durant les premiers siècles de la colonisation (Vergolino *et al.*, 2016).

Par la suite, le Sertão a surtout été peuplé après la Loi de la terre de 1850 qui rendait accessible l'obtention de terres seulement par son achat. De nombreuses personnes ont migré vers l'intérieur du Sertão, où des terres libres étaient encore disponibles et des administrateurs, des agriculteurs ou des vachers s'y installèrent (Caron & Sabourin, 2001; MDA, 2010). Les inégalités sociales et économiques entre les différents groupes qui occupaient la terre étaient dominées par les grands propriétaires (MDA, 2010). Aujourd'hui, les petits producteurs familiaux dominent le territoire de la zone semi-aride avec 77 % des terres qui occupent entre 1 à 20 ha et 94 % qui ont moins de 100 ha (Lira *et al.*, 2005).

### **1.2.3 Diversité ethnique**

Le Sertão possède une grande diversité ethnique en raison de son histoire qui s'est modulée depuis des siècles. Les autochtones, qui étaient présents bien avant l'arrivée des Européens, formaient divers groupes et communautés qui étaient répartis à plusieurs endroits dans la région, comme au Pernambuco où aujourd'hui la plus grande concentration d'autochtones au Brésil s'y trouve (Vergolino *et al.*, 2016).

De plus, le Nord-est qui constituait la porte d'entrée par où des milliers de personnes arrivaient d'Afrique pour servir comme esclave en a poussé de nombreux à se réfugier dans des communautés isolées et éloignées des centres urbains, les *Quilombolas* qui subsistent encore de nos jours (Santos, 2016a). Bahia est l'état qui compte le plus grand nombre de descendants afro-brésiliens (Gouvernement du Brésil, 2012a). Aussi, les populations descendantes des Européens, nommés *Pardos*, constituent une autre catégorie d'ethnie présente sur le territoire, avec en plus tous les métissages qui ont eu lieu à travers les siècles et entre les différentes ethnies. Enfin, tous ces groupes présentent des croyances et des pratiques qui forment le patrimoine culturel riche de la région (Silva *et al.*, 2017).

### **1.2.4 Éducation**

Conformément à la Loi 9.394 de 1996 qui décrit les lignes directrices et de base de l'éducation nationale au Brésil, elle se compose de l'enseignement de base; formé par l'éducation *infantil* (3 à 5 ans), *fundamental* (6 à 14 ans), *médio* (15 à 17 ans) et de l'enseignement *superior* (18 ans et plus), avec la graduation, la post-graduation, la maîtrise, le doctorat, etc. (Gouvernement du Brésil, 2012b). L'enseignement *fundamental* est gratuit et obligatoire à l'école publique à partir de l'âge de sept ans. Il est également gratuit pour les personnes qui n'y ont pas eu accès durant cette tranche d'âge (MEC, 2002). L'enseignement *médio* est aussi offert gratuitement, mais n'est pas obligatoire (MEC, 2002).

Malgré les exigences fédérales en matière de scolarité, en 2010, au Nord-est, 59,1 % de la population de dix ans et plus n'avait reçu aucune éducation ou n'avait pas complété le niveau d'enseignement *fundamental* (IBGE, 2012). Les personnes ayant complété le niveau *fundamental* ou n'ayant pas complété l'enseignement *médio* étaient de 15,3 %. Ceux ayant complété ce dernier ou ayant entamé des études de niveau *superior* étaient de 20,5 %, tandis que seulement 4,7 % de la population avait un niveau *superior* complet (IBGE, 2012). Avec ces résultats, le Nord-est se classe au dernier rang de toutes les régions du Brésil pour le degré de scolarité. De plus, il détient les indices d'analphabétisme les plus élevés au pays (IBGE, 2012).

La majorité des analphabètes dans l'ensemble du Brésil sont les personnes âgées ou encore les adultes âgés, ceci se constate surtout chez les femmes, les communautés afro-descendantes, les autochtones, les personnes vivant dans les milieux ruraux et finalement celles vivant dans la région du Nord-est (Peres, 2011). En fait, il n'y a aucune école destinée à l'éducation des personnes âgées et les milieux ruraux brésiliens sont favorables à des indices de scolarité faible étant donné la précarité des écoles qui s'y retrouvent (Peres, 2011).

### **1.2.5 Emplois et revenu domiciliaire**

Dans le Nord-est, le taux d'activité, pour une semaine, des personnes de 15 ans et plus est le plus faible au pays, avec 58,1 % (IBGE, 2012). Le faible taux d'activité en zone rurale peut s'expliquer par le fait que la perception des habitants de leur propre travail, plus souvent de l'autoconsommation, n'est pas déclarée comme étant un travail (IBGE, 2014). En fait, en zone rurale, 35,4 % des habitants disent n'avoir aucun revenu (IBGE, 2014). En 2010, il a été estimé qu'environ quatre millions de familles vivant dans la région semi-aride avaient un revenu de 140 BRL par mois, soit 50 CAD (Buainain & Garcia, 2013).

Un programme gouvernemental, nommé *Programa de Bolsa Familia*, a instauré une aide gouvernementale pour supporter les familles dans le besoin. C'est un soutien financier qui est accordé aux familles vivant dans la pauvreté et l'extrême pauvreté. Il est calculé comme étant de 154 BRL par habitant, par mois, soit environ 60 CAD (MDS, 2017). Les conditions particulières de chacune des familles sont évaluées et le montant varie en fonction de leurs spécificités, comme le nombre d'enfants par famille (Pero, 2012).

De plus, de manière générale, la division des tâches entre les hommes et les femmes est assez importante. Cependant, de plus en plus d'études montrent l'importance de l'implication des femmes d'un point de vue économique dans le travail en zone rurale. Elles participent principalement aux tâches reliées à l'élevage

des volailles et des porcs de même qu'au maintien du jardin et du potager ou encore aux tâches administratives pour lesquelles elles sont d'ailleurs les principales responsables (Vidal, 2011a; 2011b).

Concernant la place des femmes dans le travail rémunéré, celui-ci a aussi augmenté au fil du temps (IBGE, 2010). Dans les zones rurales de l'intérieur du Nord-est, leur contribution financière était de 51,0 % en 2010, faisant la région où les femmes participaient le plus au revenu familial (IBGE, 2014). Les hommes seraient toutefois mieux payés dans les emplois conventionnels que les femmes, et ce, bien que leur salaire ait augmenté depuis les dernières années (Barreto & Menezes, 2014). Enfin, une conscience généralisée dans l'ensemble du pays se développe entourant le thème des genres et tend à faire diminuer les écarts entre les hommes et les femmes.

### **1.2.6 Activités économiques**

Le semi-aride brésilien aurait souffert d'une économie problématique à cause des conditions naturelles comme les sécheresses fréquentes qui fragiliseraient la base économique et sociale de la région (Lima & Gatto, 2013). Cependant, depuis les dernières années, l'économie de la région a montré un accroissement impressionnant de son PIB (Produit intérieur brut), augmentant celui-ci de 4,4 % entre 2000 et 2010, dépassant la moyenne du Nord-est enregistrée à 4,0 %. Ceci est encore plus vrai pour l'état du Pernambuco avec un PIB augmenté de 4,6 % (Lima & Gatto, 2013). Le PIB municipal s'est également accru dans 268 municipalités représentant des augmentations variantes entre 75 % et 743 % (Buainain & Garcia, 2013). Ainsi, malgré qu'elle soit toujours présente, la pauvreté à laquelle font face les habitants de l'intérieur du Nord-est serait en processus de transformation.

Concernant les activités économiques, dans la zone rurale elle est largement représentée par l'élevage du bétail et l'agriculture, qui sont souvent réalisées ensemble, dans un système d'agropastoral. Dans une moindre mesure, les activités d'exploitation des ressources naturelles, comme l'extraction du bois de chauffage pour les usages domestiques, sont également présentes (Sampaio & Batista, 2004).

Les activités reliées à l'élevage du bétail sont considérées comme dans les plus importantes pour les agriculteurs familiaux de la région. Ces activités sont habituellement plus durables que l'agriculture, car elles sont moins vulnérables aux conditions climatiques semi-arides de la région et peuvent se faire sur des terres qui ne sont pas propices à l'agriculture (Correia *et al.*, 2005). La résistance des bêtes en périodes de sécheresse est donc un facteur indispensable pour garantir la sécurité alimentaire et les emplois pour les familles rurales (Coutinho *et al.*, 2013).

Les élevages caprins et ovins, qui étaient utilisés traditionnellement sur le territoire et qui le sont encore aujourd'hui, sont largement établis de manière extensive. Les troupeaux sont relativement libres sur les



fermes et se nourrissent de la végétation produite par la Caatinga durant la saison de pluie (Holanda Junior & Lima, 2006). La nécessité alimentaire de ces animaux est beaucoup plus faible que celle des bovins et leur cycle de reproduction plus rapide, ce qui est bénéfique économiquement pour les producteurs (Correia *et al.*, 2005). De plus, le transport et les coûts sont moins importants, rendant l'accès plus grand pour les producteurs et les consommateurs (Holanda Junior & Lima, 2006). Quoi qu'il en soit, l'élevage bovin est également présent dans la région et se fait principalement dans l'état de Bahia (Correia *et al.*, 2005).

L'élevage caprin est celui qui est le plus important, en fait, en 2004, il y avait plus de dix millions de chèvres sur le territoire, correspondant à 88 % du cheptel total brésilien. L'élevage ovin quant à lui était représenté par plus de sept millions de bêtes (Sampaio & Batista, 2004). Néanmoins, dans la région semi-aride, une augmentation générale des cheptels (ovins 31,0 %, caprins 27,0 % et bovins 13,0 %) a été enregistrée entre 1996 et 2006 (Carreia *et al.*, 2005).

Toutefois, la sécheresse reste un obstacle à la production à cause, entre autres, de la croissance fourragère limitée durant cette période (Lira *et al.*, 2005). Des suppléments alimentaires sont habituellement donnés aux bêtes lors de la saison sèche (Holanda Junior & Lima, 2006). Le modèle actuel n'est pourtant pas durable à long terme, car une grande pression est exercée sur la végétation native entraînant la perte de la biodiversité locale (Sampaio & Batista, 2004).

Concernant les activités agricoles, elles se distinguent en deux types d'agricultures qui façonnent le Nord-est: familiale et non familiale. La première étant celle qui domine dans le Nord-est, comme dans le Sertão. Il y aurait plus de deux millions d'établissements familiaux contre environ deux cents milles qui ne le sont pas (IBGE, 2006). L'agriculture familiale est soumise à la Loi 11.326 de 2006 qui définit ses paramètres et ses caractéristiques. Pour être considéré comme un agriculteur familial ou un entrepreneur familial rural, les activités doivent être pratiquées en zone rurale, la main-d'œuvre doit provenir de la famille, les revenus doivent avoir un pourcentage minimum du revenu familial qui provient des activités économiques de l'établissement. Les agriculteurs familiaux sont aussi les forestiers, pisciculteurs, extravistes, pêcheurs, autochtones, quilombos et colons de la réforme agraire (Gouvernement du Brésil, 2006).

L'agriculture non familiale, moins importante, est localisée notamment dans les vallées des cours d'eau du Rio São Francisco (Bahia) et de celui d'Açu (Rio Grande do Norte). Compte tenu du fait que les terres sont situées à proximité de source d'eau, elles sont irriguées. L'exploitation fruitière y est principalement réalisée et est destinée en grande partie à l'exportation. La production se compose d'une grande variété de fruits, dont le raisin, la papaye, la mangue, la noix de coco, etc. (Castro, 2013). D'autres cultures comme celle du soja ou du maïs sont également importantes sur le territoire (Castro, 2013).

Les petits producteurs sont souvent désavantagés en ce qui concerne l'accès aux technologies, au crédit et au marché de consommation, ce qui entraîne l'exode rural ou force les agriculteurs à pratiquer une agriculture de subsistance (Augusto, 2003). L'agriculture de subsistance est particulièrement présente dans le Sertão (Castro, 2013). Dans la région semi-aride du Brésil, elle est soumise à un écosystème fragile, ainsi qu'aux caractéristiques particulières du sol et du climat qui limitent la production, comme durant la saison sèche, et peut entraîner des problèmes de revenus (Alves *et al.*, 2009; Castro, 2013).

En général, les activités économiques s'accompagnent d'une déforestation de la Caatinga qui peut avoir des conséquences sur l'écosystème (Alves *et al.*, 2009). De plus, la méconnaissance de la complexité de la région semi-aride a fait en sorte d'introduire des pratiques agropastorales inadéquates d'un point de vue de la durabilité de l'écosystème provoquant des déséquilibres environnementaux comme la perte de la fertilité des sols (Silva *et al.*, 2003). Ceci est également vrai pour l'usage des ressources naturelles qui s'est fait de manière non durable durant des décennies (Alves *et al.*, 2009). Aujourd'hui, le Sertão est soumis, entre autres, à des processus de désertification, d'érosion, de contamination, de salinisation et de compaction des sols (Alves *et al.*, 2009). Les altérations de l'environnement engendrent également une réduction de la qualité de vie des habitants du Sertão, par la dégradation des terres et ceci est encore plus vrai lorsque ceux-ci ont un faible revenu (Alves *et al.*, 2009).

### **1.3 Utilisation des produits phytosanitaires**

Au Brésil, la majorité des produits agrochimiques se retrouve dans le secteur agricole (Sarcinelli, 2003), où 10,1 kilos de pesticides par hectare sont pulvérisés ou intégrés aux cultures agricoles chaque année dans le but de lutter contre les organismes indésirables qui s'introduisent dans les cultures. Le Brésil est le plus grand consommateur au monde, avec le cinquième des produits fabriqués mondialement qui y sont utilisés (Bombardi, 2012).

La Loi brésilienne N° 4.785 de 1965, définit les produits phytosanitaires comme des substances ou des préparations chimiques ou biologiques qui servent à prévenir, repousser ou détruire les insectes, les champignons, les plantes indésirables, les nématodes, les acariens, les rongeurs et toutes les autres formes de vie animale ou végétale qui sont nuisibles aux plantes et à la production agricole (Gouvernement du Brésil, 1965).

De manière plus large encore, la Loi N° 7.802 de 1989 définit les produits agrochimiques et les produits connexes comme des substances et des agents physiques, chimiques ou biologiques qui sont destinés à être utilisés dans la production, l'emmagasiner et le traitement des produits agricoles. Ceux-ci peuvent s'appliquer dans les environnements comme les pâturages, les forêts (originales ou semées), l'eau et les milieux urbains. L'objectif de ces produits est de modifier la composition de la flore et de la faune dans le

but d'agir contre les effets néfastes des organismes vivants considérés comme nuisibles (Gouvernement du Brésil, 1989a).

Sur le plan international, le terme « pesticide » est largement employé pour désigner les produits phytosanitaires (Pereira, 2013). Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, les pesticides sont définis comme étant toute substance ou mélange de substances qui peut être chimique ou biologique et qui a comme effet de repousser, détruire, sinon contrôler les espèces ravageuses ou encore réguler la croissance des végétaux (FAO, 2014). Le traitement chimique sur les plantes ou une partie de celle-ci reste la méthode de contrôle la plus répandue (Peirera, 2013). Au Brésil, les pesticides ont une connotation décrivant leur effet délétère sur la santé humaine et l'environnement (Pereira, 2013).

Même si les pesticides ont fait leur apparition au pays vers 1940, la vente et l'utilisation se sont surtout accentuées après 1975 et n'ont cessé d'augmenter (Terra & Paleaz, 2008). Cet accroissement s'inscrit dans le courant de la Révolution verte qui encourageait l'utilisation de variétés sélectionnées, d'engrais, de pesticides, d'irrigation des terres et de mécanisation (Caron & Sabourin, 2001). Le gouvernement brésilien a également encouragé les producteurs à l'achat de ces produits par des subventions qui leur étaient octroyées (Caldas, 2016).

C'est le *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento* (MAPA) qui s'occupe des procédures en matière de contrôle gouvernemental des substances et produits agrottoxiques au pays. Ainsi, par les organismes gouvernementaux, il se charge de faire l'évaluation des caractéristiques agronomiques, toxicologiques et écotoxicologiques de chacune des substances, d'établir les restrictions, ainsi que les recommandations pour l'utilisation de chacune d'elle (Peres *et al.*, 2003).

Dans la région semi-aride, comme ailleurs au pays, l'usage des pesticides est très répandu. Le Nord-est est d'ailleurs dépendant de l'utilisation de ces produits qui sont considérés comme fondamentaux pour les récoltes (Augusto, 2003). Bahia est le septième état qui consomme le plus de pesticide au Brésil, avec 6,4 % des ventes totales en 2009 (IBAMA, 2010).

Dans une étude effectuée dans le Sertão de Paraíba en 2009, tous les petits producteurs pratiquant l'agriculture familiale qui ont été interrogés ont mentionné qu'ils utilisaient ou avaient déjà utilisé des produits chimiques pour leurs cultures (Neto *et al.*, 2009). De plus, les procédures d'application des produits chimiques sont inadéquates, d'autant plus qu'en général, les agriculteurs ne reçoivent pas d'assistance technique ou d'enseignement sur les procédés d'utilisation avant l'application, ainsi que les besoins réels du sol et des plantes (Gomide, 2005; Veiga, 2007; Neto *et al.*, 2009; Cerqueira *et al.*, 2010).

La motivation des agriculteurs à l'utilisation des pesticides est qu'ils apportent un gain en temps et en productivité. Dans de nombreux cas, il est plus simple, avantageux économiquement et plus rapide de traiter la culture à l'aide de tels produits que de faire le travail manuel, comme retirer les plantes gênant les cultures (Collard & Burte, 2014; Caldas, 2016). Pour ces familles, la sécurité alimentaire y est également assurée pour l'année, car les cultures sont protégées et des frais supplémentaires n'ont pas à être déboursés pour d'autres aliments de base à des prix élevés sur le marché (Collard & Burte, 2014). De plus, les producteurs font largement appel aux produits agrochimiques dans le but de compenser la perte de productivité causée par la dégradation des sols (Veiga, 2007). Ainsi, des alternatives sont difficiles à envisager pour les producteurs, car aucune solution ne leur semble possible (Augusto, 2003; Gomide, 2005).

### **1.3.1 Types de produits phytosanitaires**

La diversité des produits existants dans le domaine de l'agrochimie est très grande. Il y aurait environ trois cents principes actifs retrouvés dans deux mille formulations commercialisées au Brésil (SUCEN, s.d.). La classification se fait selon différents critères. D'abord, considérant leur degré de toxicité sur l'environnement et la santé humaine, quatre classes définissent les produits comme étant hautement dangereux (classe I), très dangereux (classe II), dangereux (classe III) et peu dangereux (classe IV). La détermination de la classe est basée sur plusieurs caractéristiques, dont les propriétés physico-chimiques, la toxicité pour les organismes vivants, la capacité d'accumulation du produit dans les tissus, la persistance dans l'environnement et son aptitude à se déplacer dans le sol, l'air et l'eau (IBAMA, 2010).

Ensuite, les pesticides peuvent être regroupés selon la nature de l'organisme ciblé pour son contrôle, ils sont composés des herbicides, insecticides, fongicides, acaricides, bactéricides, nématocides, etc. (Pereira, 2013). Les herbicides sont reconnus pour être les plus utilisés au Brésil, avec près de 130 000 tonnes consommées en 2009. Cette quantité comprend 90 ingrédients actifs différents répartis dans 445 marques commercialisées et la toxicité est principalement de type II et III (IBAMA, 2010). Viennent ensuite les insecticides et des fongicides qui sont également largement répandus où 90 000 et 36 000 tonnes ont été utilisées en 2009 (IBAMA, 2010). La toxicité de ces produits est aussi majoritairement de type II et III, avec également plus de produits de type I et IV que dans les herbicides (IBAMA, 2010).

Enfin, le groupe chimique auquel un produit agrottoxique appartient sert également de critère de classification. Les organochlorés, organophosphorés, carbamates, pyréthroïdes et glyphosate sont quelques exemples des groupes existants pour ce classement (Peres *et al.*, 2003). En ce qui concerne l'usage dans la région semi-aride, une étude effectuée dans la municipalité de Cajazeiras dans le Sertão de Paraíba a montré que les travailleurs agricoles utilisaient majoritairement des organophosphates (36,7 %), suivi des

carbamates (10,2 %), des dérivés d'acide phénoxyacétique (10,2 %), des pyréthroïdes (6,2 %) et des organochlorés (6,1 %) (Cerqueira *et al.*, 2010). Une autre étude réalisée dans le même état a établi que les substances actives les plus utilisées étaient le Folidol, un organophosphate, le Decis, un pyréthroïdes et le Karaté, un pyréthrinoloïde (Neto *et al.*, 2009). Au Sertão dans l'état du Ceará, les organophosphorés, dont la paration de méthyle (Folisuper 600 BR) et le monocrotophos (Azodrin 400) ont également été mentionnés comme produits agricoles les plus utilisés pour combattre les ravageurs, dans ce cas-ci spécifiquement sur les cultures de haricots et de maïs (Castro *et al.*, 2011).

En 1985, le Brésil a interdit sur tout le territoire la commercialisation, l'utilisation et la distribution des pesticides organochlorés, autant en ce qui concerne l'agriculture et l'élevage. Les produits de la liste suivante ont été proscrits: Aldrim, HCB (Hexachlorobenzène), Canfeno, Clorado (Toxaphène), DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), Dodeclacoloro, Endrim, Meptacoloro, Lindane, Endosulfan, Metoxicloro, Nonacloro, Pertacolorofenol, Dicofof et Clorobenzilato (Gouvernement du Brésil, 1985).

Cependant, malgré les interdictions d'utilisation de certains pesticides, plusieurs continuent d'être employés illégalement (Londres, 2011). Le monocrotophos qui était utilisé dans une des études mentionnées précédemment (Castro *et al.*, 2011) a d'ailleurs été interdit d'utilisation en 2008 (AVINSA, 2018). La paration de méthyle, quant à elle, a été interdite d'utilisation à partir de 2016 (AVINSA, 2016), mais était légale au moment de cette même étude effectuée par Castro *et al.* (2011). Dans d'autres circonstances, ce sont des produits qui n'ont jamais été autorisés au pays qui sont à l'emploi (Londres, 2011). Dans l'état du Pernambuco, des échantillons dits insatisfaisants ont été trouvés avec des niveaux de résidus supérieurs à la limite établie ou portant un pesticide non autorisé pour la culture (SES, 2014).

### **1.3.2 Persistance dans l'environnement**

La persistance dans l'environnement s'établit en fonction de la demie-vie d'une substance, c'est-à-dire, le temps nécessaire après l'application, pour qu'une substance réduise sa concentration de moitié, et ce, indépendamment de sa concentration initiale dans l'environnement. La substance continue, par la suite, de se dégrader au même rythme (Barrigossi *et al.*, 2005). La persistance de la demi-vie d'une substance se divise en trois catégories: de courte durée, jusqu'à 90 jours; de durée moyenne de 91 à 180 jours et de longue durée, soit plus de 180 jours (SUCEN, s.d.). Le *Programa de Analise de Residuos de Agrotóxicos em Alimentos* (PARA) a affirmé que certains pesticides trouvés sur des échantillons d'aliments analysés pourraient provenir de résidus de pesticides persistants dans l'environnement, donc qui auraient été absorbés par les plantes (Londres, 2011).

De plus, de nombreux facteurs biotiques et abiotiques modulent la vitesse à laquelle les produits agrochimiques sont dégradés. Les conditions environnementales telles que les différents types de sols, très variés dans la région du Sertão (section 1.1.2) avec leurs particularités comme leur texture, leur composition minérale, leur acidité et la teneur en matériel organique interagissent avec les pesticides (Barrigossi *et al.*, 2005; Souza *et al.*, 2001). Plus le pH du sol est acide plus la solubilité des pesticides augmente, les rendants susceptibles à rejoindre les couches d'eaux souterraines. Aussi, les sols sableux entraînent l'eau plus facilement que les sols qui le sont moins et diminuent le temps de contact des pesticides avec les particules. Les sols profonds augmentent le temps de contact des pesticides avec les particules du sol, ce qui aide aux processus chimiques pour leur décomposition (Gavrilescu, 2005). Ensuite, le climat avec la température, l'humidité, le rayonnement solaire et l'activité biologique sont d'autres composants influençant la décomposition des pesticides (Barrigossi *et al.*, 2005). Elle augmente, par exemple, à des températures plus élevées (Melo *et al.*, 2010).

Aussi, la formation de nouveaux composés se produit suite à la modification de la structure moléculaire d'un pesticide par sa dégradation. Ceci peut donner des produits pouvant être moins toxiques ou plus toxiques que la substance originale (Barrigossi *et al.*, 2005; Gavrilescu, 2005). Par exemple, au contraire des fongicides organiques qui ont une demi-vie courte, les fongicides inorganiques, comme les sulfates de cuivre, peuvent persister des décennies dans l'environnement. Cependant, les produits de la décomposition des fongicides organiques peuvent également persister longtemps (Ribas & Matsumura, 2009).

Il faut aussi prendre en compte la manière dont les produits sont intégrés à l'environnement, car leur mobilité en est affectée. Des différences dans la structure chimique entre les pesticides permettent de déterminer comment un pesticide se déplace dans l'environnement. Certains sont solubles dans l'eau, d'autres se volatilisent facilement, etc. (Gavrilescu, 2005). Ainsi, les composés peuvent être transportés par le vent sur des distances plus ou moins longues et plus facilement lorsqu'ils sont pulvérisés sur les cultures, tandis que lorsqu'ils sont appliqués directement au sol, ils peuvent être conduits vers les eaux superficielles ou souterraines (Barrigossi *et al.*, 2005). D'ailleurs, la pulvérisation des pesticides sur les cultures se fait largement chez les petits et moyens producteurs au Brésil (Londres, 2011). Aussi, dans le semi-aride, les pluies qui sont concentrées à un moment de l'année peuvent entraîner, par le ruissellement, la contamination des ressources disponibles en eau. Ces eaux sont par la suite utilisées sans traitement pour la consommation humaine ou encore pour l'irrigation des terres (Augusto, 2003). D'un autre côté, la rareté des ressources hydriques pousse les habitants à faire des barrages (*açudes*) pour retenir l'eau, ce qui augmente les risques de contamination et réduit sa qualité (Augusto, 2003).

### **1.3.3 Impact sur la santé humaine et l'environnement**

Au Brésil, la deuxième cause principale d'intoxication, après les médicaments, se fait par les produits agrochimiques (ANVISA, 2009). Les effets nocifs des pesticides sur la santé humaine ont été démontrés dans de nombreuses études effectuées au Brésil, mais aussi particulièrement dans la zone d'étude d'intérêt, le semi-aride. Les agriculteurs et toutes personnes en contact avec les pesticides peuvent développer des problèmes de santé aigus ou chroniques, ressentir des effets indésirables suite à l'exposition aux produits agrochimiques, passant par des maux de tête, des vomissements, des lésions hépatiques, des allergies respiratoires et dans les cas extrêmes, la mort (Ribas & Matsumaras, 2009; Londres, 2011). Bien entendu, la durée de l'exposition, la concentration des éléments actifs, la nature du pesticide et sa toxicité sont des éléments à considérer affectant les effets sur les humains. Dans le Nord-est, les cas d'incidence des décès à cause d'un empoisonnement aux pesticides ont doublé entre 2000 et 2010 (Caldas, 2016).

Dans l'environnement, les pesticides peuvent affecter la faune et la flore. Ils peuvent interférer dans les processus de base des écosystèmes, comme la respiration du sol et les cycles des nutriments, ce qui peut avoir comme conséquence la réduction des populations d'organismes vivants dans ces milieux (IBAMA, 2010). L'acidité du sol peut également augmenter, affectant la flore microbienne présente et entraînant la détérioration de sa composition (Augusto, 2003). De plus, de nombreux organismes non ciblés peuvent être atteints avec l'application des pesticides sur les cultures. En fait, il n'y aurait qu'une faible proportion des produits phytosanitaires qui soit réellement en mesure d'atteindre les organismes ciblés (Gavrilescu, 2005). L'usage excessif des produits phytosanitaires entraîne aussi la résistance des pathogènes et des autres organismes ciblés dans le traitement des cultures. Les agriculteurs appliquent alors plus de pesticides pour remédier à ce problème. Ainsi, ce type de fonctionnement n'est pas soutenable à long terme (Augusto, 2003).

L'écosystème de la région semi-aride au Brésil mérite une attention particulière quant à l'usage qui est fait des produits chimiques utilisés en agriculture. Les conditions précaires socio-économiques des habitants de la zone rurale doivent être prises au sérieux et des actions doivent être posées dans le but d'améliorer le bien-être des gens et la qualité environnementale.

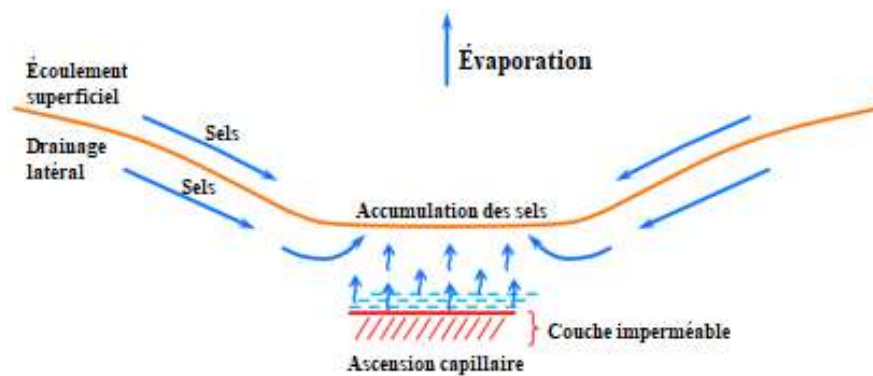
### **1.4 Processus de salinisation**

La salinisation est l'accumulation excessive de sels solubles comme les chlorures, les sulfates, les bicarbonates de sodium, le calcium et le magnésium. Dans une moindre mesure le potassium, l'ammonium, les nitrates et les carbonates, le tout retrouvé dans les couches supérieures du sol. L'eau est

l'agent qui transporte ces sels vers la surface et les sels sont les minéraux qui ont été formés par les roches (Ribeiro *et al.*, 2016). Au Brésil, un sol est classifié salin lorsque sa conductivité électrique à saturation est supérieure à quatre mS (Klamt & Kauffman, 1985).

La salinisation est un phénomène courant dans les régions arides et semi-arides du monde. Il y aurait environ 160 000 km<sup>2</sup> des terres concernées au Brésil, représentant 2 % du territoire national, avec la plus grande partie située dans le Nord-est (Ribeiro *et al.*, 2003). Ainsi, par son climat semi-aride, le Sertão est aux prises avec cette problématique qui peut se produire de manière naturelle ou être induite par les activités humaines.

D'abord, la principale cause d'accumulation des sels se fait surtout dans les dépressions, entre autres, dans les Fluvisols, Planosols, Vertisols ou Gleysols à cause du ruissellement et du drainage latéral de l'eau chargée en sels. Ceux-ci sont alors déposés et accumulés sur une petite couche imperméable qui empêche leur dispersion (Figure 1.4) (Ribeiro *et al.*, 2016). Ensuite, il peut y avoir l'élévation par capillarité des sels présents dans le sol qui sont alors accumulés dans les couches du sol (Silva *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2016). Lorsque l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations, il est impossible pour l'eau de percoler à travers le sol et de se lixivier, laissant les sels dans les couches supérieures du sol (Freire & Freire, 2007).



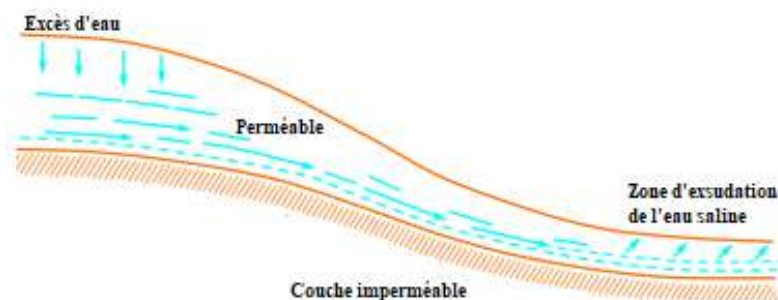
**Figure 1.4 Processus naturel de salinisation le plus fréquent dans la zone semi-aride au Brésil**

Source : Modifié de Ribeiro *et al.* (2016)

Traduction libre

Enfin, lors d'un excès en eau, les sels peuvent également s'accumuler dans des zones basses ou des pentes de collines à cause du drainage latéral souterrain provenant d'une région supérieure et contrôler par une couche imperméable. Les Luvisols et les Planosols sont particulièrement propices à ce type de salinisation (Figure 1.5) (Ribeiro *et al.*, 2016).





**Figure 1.5 Processus naturel de salinisation dans la zone semi-aride au Brésil**

Source : Modifié de Ribeiro *et al.* (2016)

Traduction libre

Dans une autre mesure, la salinisation peut être engendrée par l'Homme. En fait, dans le Sertão, le besoin croissant d'augmenter la production alimentaire, à cause de l'augmentation de la population et des pressions économiques causées par ces activités ont considérablement augmenté l'expansion des zones cultivées et entraîné la dégradation des terres par la salinisation (Andrade *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2016).

Le processus se traduit par le dépôt de sels à la surface du sol qui se trouvaient en solution dans l'eau d'irrigation (Ribeiro *et al.*, 2016). L'accumulation des sels à la surface du sol se fait également en raison de l'élévation de la nappe phréatique qui est utilisée pour les besoins d'irrigation des terres cultivées (Ribeiro *et al.*, 2016). Avec l'augmentation de l'agriculture et de l'irrigation, la possibilité des sols à être soumis à ce phénomène s'est accrue. Un autre facteur également responsable de la salinisation des terres est l'utilisation excessive et inadéquate d'engrais ayant des teneurs élevées en sels, comme le chlorure de potassium et le nitrate d'ammonium, ce qui résulte en une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol, qui plus est, nuit au développement des plantes (Wanderley, 2009; Dias & Blanco, 2010).

Enfin, l'utilisation de machines permettant le traitement des eaux impropres à la consommation humaine, les dessalinisateurs, est en augmentation dans la région. La technique utilisée est l'osmose inverse, où les effluents du traitement riches en sels sont rejetés dans l'environnement, souvent sans traitement préalable (Porto *et al.*, 2004). Ceci encourage l'augmentation des teneurs en sels et est donc un autre facteur de risque associé à la salinisation. Ces rejets peuvent altérer les propriétés physico-chimiques du sol et affecter la biodiversité qui s'y trouve (Dias & Blanco, 2010).

#### 1.4.1 Impacts de la salinisation

Les effets directs et indirects de l'augmentation de la teneur en sel dans le sol et l'eau ambiante sont nombreux. D'abord, les sols subissent une augmentation de la densité et de la rétention de l'eau, ainsi qu'une réduction de l'infiltration de l'eau à cause des ions sodiques retrouvés en trop grande quantité (Dias & Blanco, 2010).

De plus, le pH peut être modifié; selon une étude effectuée dans la région de Moxotó au Pernambuco, des échantillons de sols ont été récupérés dans une zone évaluée comme contenant un haut niveau de sels. Les échantillons détenaient un pH près de la neutralité ou étaient modérément alcalins, allant jusqu'à 8,25 (Silva *et al.*, 2014). L'augmentation du pH fait diminuer les taux de nutriments disponibles pour les plantes comme le cuivre, le zinc ou le manganèse et peut également nuire à l'absorption des plantes, qui réagissent mieux à des pH aux alentours de 5,5 à 6,5 (Malavolta *et al.*, 1997). Dans une autre étude effectuée avec des plants de *Beta vulgaris* et la technique d'irrigation par gouttelettes, la salinité semblait augmenter en descendant plus profondément dans le sol, ce qui pourrait altérer l'absorption des nutriments par les racines des plantes se trouvant dans les couches contenant une plus grande salinité (Silva *et al.*, 2013).

La croissance et le développement des plantes peuvent également être affectés à cause de la réduction de l'absorption de l'eau qui est contrôlée par l'effet osmotique. De plus, l'augmentation des ions dans le flux transpiratoire peut engendrer des dommages directs dans les feuilles des plantes (Munns, 2005).

L'espèce *Vigna unguiculata* est un haricot largement consommé dans la région semi-aride du Brésil; il s'agit d'ailleurs du principal aliment de subsistance pour les habitants du Sertão. Les petits et moyens producteurs cultivent cette plante abondamment pour la consommation domestique et vendent l'excédent (Lima *et al.*, 2007). Cependant, il a été constaté que l'utilisation d'eau saline pour l'irrigation, qui provient généralement de sources de faible qualité ou de la réutilisation d'eau de drainage chargée en sels, nuit la croissance de *V. unguiculata*. En fait, plus le taux de sel est grand, plus sa croissance diminue (Lima *et al.*, 2007). Les attributs affectés sont la hauteur de la plante, le diamètre de la tige, le nombre de feuilles et la quantité de nodules présente dans les racines (Lima *et al.*, 2007; Andrade *et al.*, 2013).

Aussi, l'augmentation de la salinité fait généralement diminuer la biodiversité présente pour la remplacer par des organismes moins sensibles aux teneurs en sels plus élevées (William, 1999). Avec le processus de salinisation, il y a possibilité de contaminer les nappes phréatiques, ainsi que les réserves d'eaux souterraines (Dias & Blanco, 2010). Les lacs et les cours d'eau intermittents présents dans le semi-aride sont des environnements importants pour plusieurs espèces de poissons qui les utilisent comme habitat et

ressource alimentaire (Medeiros & Malchik, 2001; Luz *et al.*, 2009). Également, l'herpétofaune est particulièrement sensible aux changements dans son environnement, elle pourrait alors être affectée par ces conditions (Albuquerque *et al.*, 2012).

Enfin, d'un point de vue socio-économique, la salinisation entraîne la perte de productivité, la qualité de la production agricole et la fertilité du sol (Dias & Blanco, 2010). En quelques années, lorsque la salinisation perdure, les terres peuvent être abandonnées par leur propriétaire, ce qui entraîne des répercussions économiques négatives (Melo *et al.*, 2008). Le problème est encore plus grave lorsque l'agriculture irriguée est une des activités importantes, comme c'est le cas dans la région de Petrolina au Pernambuco et Juazeiro à Bahia, la région d'Açu et Mossoró à Rio Grande do Norte et dans les pôles de croissance agricoles du Ceará (Vasconcellos, 2014). Les plantes généralement cultivées sont de type glicophytes, elles sont donc peu tolérantes aux actions des sels sur leur métabolisme (Dias & Blanco, 2010). Les sols avec un trop grand taux de dégradation ne sont plus propices aux activités agricoles et des méthodes de récupération doivent avoir lieu (Silva *et al.*, 2014). De plus, l'eau douce est une ressource essentielle pour les habitants de la région semi-aride, d'autant plus que les petits barrages d'emmagasinement de l'eau, utilisés pour la consommation humaine, s'assèchent rapidement en période de sécheresse prolongée (Bétard *et al.*, 2011).

La problématique de la salinisation est encore plus grave lorsqu'elle contribue à la désertification des terres. Au Brésil, la zone sujette à la désertification fait un peu plus de 1 340 000 km<sup>2</sup> (Perez-Marin *et al.*, 2012). L'usage intensif des terres et leur exploitation inadéquate pour la production avec l'irrigation qui a engendré la salinisation, l'utilisation massive des pesticides et le surpâturage qui a laissé de grandes étendues de terres sans végétation font partie des causes entraînant la désertification dans la région (Bétard *et al.*, 2001; Silva & Freitas, 2017). La perte de la biodiversité, la perte de la fertilité du sol, l'érosion génétique des espèces végétales, l'érosion du sol, etc., peuvent entraîner l'exode rural des populations et créer une instabilité régionale (Sampaio & Batista, 2004; Pachêco, 2006). La dépendance des ressources naturelles pour la subsistance des habitants de la région démontre une grande vulnérabilité sociale et économique (Perez-Marin *et al.*, 2012).

Le développement intensif de l'intérieur des terres du Nord-est Brésil s'est fait en ignorant les composantes climatiques, environnementales, ainsi que la situation précaire des habitants de la région. Le premier chapitre a permis de déterminer les conditions spécifiques de la région semi-aride du Brésil. Les aspects les plus révélateurs qui façonnent la région ont été décrits et concernent le climat semi-aride et les sécheresses, la biodiversité du biome de la Caatinga qui domine le territoire, la situation économique faible des habitants, les indices de développements bas de la région, la vie en milieu rural et les activités agropastorales dominantes. De ces éléments ont surgi des problèmes reliés à l'utilisation des terres et à sa

productivité. Pour renverser la situation, des solutions pour améliorer les conditions de vie et contrecarrer la dégradation environnementale doivent être proposées. En attendant de réels changements dans les pratiques productives agricoles, des actions concrètes peuvent être entamées pour limiter les dommages associés à la biodiversité et à la vie humaine. C'est dans cette optique que le chapitre suivant s'articule, c'est-à-dire en proposant une solution: la phytoremédiation, qui pourrait être considérée dans la région à l'étude et qui viserait à dépolluer les sols contaminés par les pesticides et ceux soumis aux processus de salinisation.

## **Chapitre 2**

### **Portrait de la phytoremédiation et son application**

Le présent chapitre détaille les caractéristiques de la phytoremédiation, en passant par ses processus, son fonctionnement, ses avantages et ses limites. Le choix de cette technique aux autres pour pallier aux problématiques des sols au Brésil s'explique par ses nombreux avantages tant sur le plan économique, qu'environnemental, ainsi que par son potentiel à traiter divers types de polluants (Anselmo & Jones, 2005). Il est nécessaire de bien comprendre ce qu'est la phytoremédiation et dans quel contexte elle évolue. À la fin du chapitre, les avancées en recherches sont présentées en ce qui concerne les sols contenant des pesticides ou ayant un taux de sels élevé. Par la suite, il sera possible de déterminer si l'application de la phytoremédiation par les propriétaires de petites et moyennes terres dans la région du Sertão est adéquate.

#### **2.1 Définition de la phytoremédiation**

La phytoremédiation est l'utilisation de plantes dans les sols, l'eau ou les sédiments contaminés par des substances organiques ou inorganiques et ayant comme objectif de les assainir (Cuunningham & Ow, 1996). Étymologiquement, le mot est formé du préfixe « phyto » désignant les plantes et de « *remedium* » qui signifie restaurer (Cuunningham *et al.*, 1997).

Malgré que le terme ne fut développé qu'au début des années 1990, l'utilisation des plantes dans le traitement des sols n'est pas récente (Cuunningham *et al.*, 1997; Procópio *et al.*, 2009). En fait, elles étaient utilisées il y a au moins 300 ans pour la décontamination de certains sites en Allemagne (Cuunningham *et al.*, 1997). Dans ses débuts, les études sur la phytoremédiation étaient principalement réalisées dans le but de retirer les métaux lourds du sol. Avec le temps, les études et les connaissances associées se sont accrues et d'autres substances chimiques et biologiques, considérées comme dégradant et nuisant un milieu en particulier ont été ajoutées à la liste. Aujourd'hui, le terme phytoremédiation ne désigne pas seulement les intrants chimiques. Par exemple, il est utilisé pour désigner le processus de dessalement des sols qui est effectué par les plantes. En fait, lors d'un apport trop grand en sel, ce dernier est considéré comme un polluant ou un contaminant et c'est pourquoi il est considéré en phytoremédiation (Carreiro & Leite, 2017).

Ainsi, la phytoremédiation sert à retirer une gamme de composés: sous-produits industriels, métaux, métalloïdes, hydrocarbures pétroliers, solvants, excès de sels, etc. (Cuunningham *et al.*, 1997). Néanmoins, les produits ciblés dans ce chapitre qui peuvent être traités par la phytoremédiation concernent spécifiquement les pesticides et les sels, problématiques auxquelles est confronté le Sertão brésilien.

De plus, la phytoremédiation s'inscrit dans le cadre des processus de remédiation. De ceux-ci, il en existe une grande variété qui peut être employée dans le traitement des sols pollués. Les techniques nécessitent souvent beaucoup de matériel et une main-d'œuvre qualifiée. La remédiation comprend des procédés physiques (injection d'air, élimination de la couche affectée, lavage du sol), chimiques (chélation, gypse, réaction), ou biologiques (microorganismes, plantes) qui permettent de traiter les substances indésirables. Par contre, la plupart du temps, la remédiation n'est associée qu'aux techniques non biologiques (Gavrilescu, 2005; Procópio *et al.*, 2009). La phytoremédiation, pour sa part, est un procédé biologique et se réalise de manière *in situ*, c'est-à-dire directement dans le type d'environnement à traiter où il y a insertion de plantes décontaminantes ou *ex situ*, en serres ou en pots (Susarla *et al.*, 2002; Gavrilescu, 2005).

Les techniques de types *in situ* sont de plus en plus préférées à celles qui sont *ex situ*, car aucun matériel n'est extrait ou transporté à un autre endroit pour son traitement, elles sont donc moins dommageables pour l'environnement (Procópio *et al.*, 2009). Enfin, dans n'importe quelle technique de remédiation, biologique ou non, après la décontamination d'un site, aucune autre action supplémentaire ne devrait être posée, car le site devrait avoir atteint des conditions environnementales acceptables (Gavrilescu, 2005).

## **2.2 Principes de la phytoremédiation**

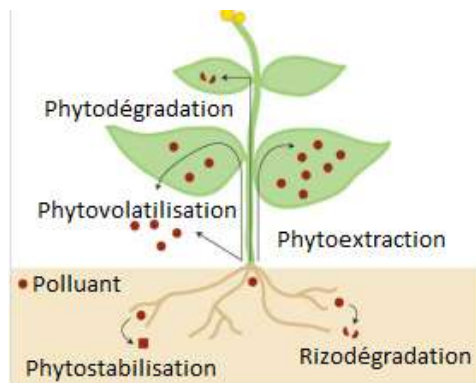
Les fondements de la phytoremédiation se basent sur les processus du cycle de vie des plantes, car tout au long de leur croissance, en acquérant l'eau et les minéraux du sol et jusqu'aux processus de décomposition, les plantes ont des effets chimiques, physiques et biologiques sur leur environnement immédiat (Cuuningham & Ow, 1996). Lors de la photosynthèse, les plantes utilisent le dioxyde de carbone atmosphérique pour capter l'énergie lumineuse et la convertir en énergie utilisable pour la fabrication de leur biomasse (ITRC, 2009). La photosynthèse, lors de l'oxydation de l'eau et de la réduction du carbone, peut être bénéfique pour dégrader certains composés. Les plantes acquièrent également, par leur système racinaire, l'eau et les nutriments inorganiques dissouts (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cl, Zn, Mn, Cu, B, et Mo) qui sont transportées dans la plante et qui contribuent à son développement. Dans ce processus, d'autres substances non essentielles comme les contaminants (Pb, Cd, As, sels en excès, etc.) sont aussi absorbées. Comme elles ne sont pas essentielles aux besoins de la plante, elles peuvent représenter un risque de toxicité, à des doses plus ou moins importantes, tout dépendant des plantes et des substances en question. Ainsi, pour réagir aux dommages potentiels que les contaminants peuvent causer aux tissus végétaux, les plantes opèrent des mécanismes physiologiques, expliqués à la section suivante, comme la séquestration ou la stabilisation de ces contaminants (ITRC, 2009).

Les contaminants peuvent également être évacués de la plante par le flux transpiratoire (ITRC, 2009). En plus, au pourtour des racines, une zone, la rhizosphère, est riche en microorganismes, dont les bactéries et les champignons qui bénéficient des nutriments, de l'oxygène et d'une source de carbone offerts par la plante. En contrepartie, les microorganismes forment une barrière aux pathogènes (ITRC, 2009). Avec la stimulation de la communauté microbienne et en effectuant leurs activités métaboliques, les microorganismes ont aussi la capacité de dégrader les contaminants du sol. C'est ce qui se produit lors des mécanismes de rizodégradation (Siciliano & Germida, 1998). Enfin, le potentiel de décontamination des sols par les plantes est spécifique au site et aux contaminants (Cuuningham & Ow, 1996). Ainsi, l'utilisation des plantes avec leur microbiote s'avère une solution efficace pour pallier à la dégradation des terres qui sont de plus en plus fréquentes (Coelho *et al.*, 2016).

Les polluants inorganiques et organiques sont absorbés de manières différentes par la plante. D'abord, les polluants inorganiques sont déplacés dans la plante grâce à des transporteurs protéinés, car ils sont des nutriments ou par ce qu'ils possèdent une structure semblable à ceux-ci et sont absorbés par inadvertance (Pilon-Smits, 2005). Les polluants organiques, de leur côté, sont habituellement synthétisés par l'humain, ils sont donc inconnus pour la plante. Ainsi, celle-ci ne possède pas les transporteurs propices pour leur acheminement à l'intérieur de la plante. Cependant, ces polluants ont la capacité de se déplacer dans les tissus végétaux grâce à la diffusion et à leurs propriétés chimiques (Pilon-Smits, 2005).

### **2.3 Techniques de phytoremédiation**

La phytoremédiation se décompose en plusieurs types qui opèrent à l'intérieur de la plante ou dans son environnement immédiat (Figure 2.1). Les mécanismes en cause sont la dégradation, l'extraction, la concentration, la volatilisation ou le confinement. Dans la plupart des cas, lors de la phytoremédiation, une combinaison de plusieurs de ces mécanismes peut se produire simultanément ou subséquent. Il peut y avoir, par exemple, l'extraction d'un contaminant par les racines de la plante suivie de sa volatilisation (Susarla *et al.*, 2002). Les mécanismes possibles sont présentés dans cette section.



**Figure 2.1 Mécanismes impliqués dans la phytoremédiation**

Modifié de: Pilon-Smits (2005)

Traduction libre

### 2.3.1 Phytoextraction

Lors de la phytoextraction, les plantes absorbent les polluants à partir des racines et les transloquent dans les parties aériennes (EPA, 2000). Le contaminant doit être dissout dans l'eau du sol et entrer en contact avec les racines pour être absorbé par la plante (ITRC, 2009). Bien qu'aujourd'hui plusieurs types de polluants sont visés par ce mécanisme, originalement, la phytoextraction n'était qu'utilisée que pour retirer les métaux lourds, dont le plomb, le nickel ou le cuivre (Cuunningham *et al.*, 1997). Le procédé permet de concentrer le contaminant dans les plantes par la lignification (ITRC, 2009). Le contaminant s'accumule dans les tissus de la plante, car il n'est pas dégradé rapidement ou complètement (Susarla *et al.*, 2002). Ceci facilite son élimination subséquente et une collecte peut alors être effectuée pour retirer du site les végétaux utilisés (EPA, 2000). Ceux-ci pourront ensuite être détruits ou utilisés à d'autres fins (Cunningham *et al.*, 1996; Pequeno *et al.*, 2014).

Des plantes dites hyperaccumulatrices peuvent concentrer une grande quantité de polluant sans en affecter leur croissance. Cependant, des plantes moins tolérantes peuvent tout de même être employées jusqu'à saturation du contaminant (Susarla *et al.*, 2002). La phytoextraction est la technique la plus utilisée pour retirer les excès de sels environnementaux. Les plantes doivent préférentiellement être de type halophyte afin de s'assurer que leur métabolisme puisse supporter la présence de grandes quantités de sels (Pequeno *et al.*, 2014). Enfin, dans d'autres cas, la phytoextraction permet aux autres mécanismes, comme la phytodégradation, de se produire par la métabolisation des contaminants absorbés (ITRC, 2009).



### **2.3.2 Phytodégradation**

La phytodégradation se produit lorsque les plantes absorbent, métabolisent et dégradent un contaminant du sol. L'activité enzymatique, qui se produit par, entre autres, la déhalogénase ou l'oxygénase se réalise à l'intérieur des cellules végétales. Ceci entraîne la transformation ou la dégradation partielle ou complète du contaminant en un composé moins dommageable pour l'environnement (Cunningham *et al.*, 1996; Greipsson, 2011; Vasconcellos *et al.*, 2012).

La fonctionnalité de la phytodégradation est basée sur la capacité de la plante à absorber le contaminant du sol (Vishnoi & Srivastava, 2008). De nombreux contaminants peuvent être dégradés de cette façon, dont des herbicides ou des insecticides (Vishnoi & Srivastava, 2008). Cependant, seuls les composés organiques peuvent être dégradés par la phytoremédiation, car les composés inorganiques ne peuvent qu'être stabilisés ou emmagasinés (Pilon-Smits, 2005). Généralement, les composés hydrophes sont dégradés avec succès par ce mécanisme (Greipsson, 2011).

### **2.3.3 Rizodégradation**

La rizodégradation, également nommée phytostimulation, est très semblable au mécanisme précédent, mais se produit dans la zone de la rhizosphère. Ce processus s'avère utile pour dégrader les composés organiques hydrophobes qui ne peuvent être absorbés par la plante (Lamego & Vidal, 2007). Le contaminant est en fait dégradé avec l'aide de l'association microbienne et fongique qui se trouve dans le sol (Cunningham *et al.*, 1996; Vasconcellos *et al.*, 2012). Lors de la décomposition des substances organiques, il peut y avoir production de composés semblables ou générer, par la minéralisation, des composés inorganiques comme du dioxyde de carbone ou de l'eau (Vishnoi & Srivastava, 2008).

De plus, la pénétration des racines dans le sol permet d'augmenter l'aération de la zone, ce qui stimule la dégradation aérobie (Susarla *et al.*, 2002). Les plantes peuvent également moduler l'environnement chimique de la rhizosphère, par entre autres, la sécrétation d'exsudats comme des sucres, acides aminés, acides organiques, acides gras, stérols, facteurs de croissance, nucléotides, enzymes, etc. (Vishnoi & Srivastava 2008). Ceux-ci sont bénéfiques aux microorganismes, car ils stimulent leur croissance (Greipsson, 2011). Avec la sécrétion d'exsudats, les conditions environnementales deviennent alors optimales et entraînent la dégradation des contaminants (Susarla *et al.*, 2002). Enfin, une autre manière de stimuler la croissance populationnelle du microbiote est d'effectuer des manipulations du pH et des nutriments, directement dans le sol (Greipsson, 2011).

#### **2.3.4 Phytovolatilisation**

La phytovolatilisation a lieu lorsqu'une substance, une fois captée dans le sol par la plante, est rejetée sous une forme modifiée ou gazeuse dans l'atmosphère par la transpiration. Les composés émis dans l'air sont considérés comme moins toxiques pour l'environnement (Vasconcellos *et al.*, 2012). L'activité microbienne facilite la volatilisation qui peut se produire autant dans les feuilles que dans les racines (Cunningham *et al.*, 2011). Les composés organiques et inorganiques qui ont une forme volatile peuvent être impliqués dans la phytovolatilisation (Lamego & Vidal, 2007). C'est le cas notamment de certains sels ou de composés du mercure, arsenic ou sélénium (Pequeno *et al.*, 2004). D'autres mécanismes comme la rhizodégradation ou la photodégradation peuvent également être impliqués dans la volatilisation du contaminant, car elles en modifient la substance initiale. Cette dernière entre ensuite dans le processus de translocation de la voie de transpiration et est renvoyée dans l'air (ITRC, 2009).

#### **2.3.5 Phytostabilisation**

La phytostabilisation, pour sa part, permet de limiter la migration des contaminants dans le sol. En fait, une barrière végétale naturelle se crée, ce qui fournit une résistance à l'érosion ou encore à la lixiviation. Ceci peut empêcher le déplacement des contaminants vers les milieux environnants ou limiter leurs interactions avec la flore microbienne du sol (ITRC, 2009). Aussi, les racines des plantes peuvent modifier les conditions environnementales comme le pH et l'humidité contenus dans le sol. Ainsi, en optant pour les plantes propices, il est possible de maintenir certains contaminants dans le sol, dont les métaux, qui sont les principaux visés par ce mécanisme et de ce fait, empêcher leur déplacement à d'autres sites (Susarla *et al.*, 2002).

#### **2.3.6 Rizofiltration**

La rizofiltration a comme objectif de retirer les métaux de l'eau. Cette technique est utilisée pour décontaminer les eaux souterraines. Elle s'opère lorsque les plantes qui sont en contact direct avec l'eau absorbent les contaminants par leurs racines (EPA, 2000). Enfin, un résumé des différents mécanismes de la phytoremédiation est présenté au tableau 2.1.

**Tableau 2.1 Mécanismes de la phytoremédiation et les types de contaminants pouvant être traités**

Mécanismes	Type de contaminant traité
Phytodégradation	Organique
Phytoextraction	Inorganique
Phytostabilisation	Inorganique
Phytovolatilisation	Organique et inorganique
Rizodégradation	Organique
Rizofiltration	Inorganique

## 2.4 Avantages

Le choix d'utilisation de la phytoremédiation dans le traitement et l'assainissement des sols contaminés dans le Sertão et ailleurs dans le monde est basé sur les nombreux avantages qu'elle possède en comparaison aux autres techniques de remédiation. En plus, dans les milieux agricoles, les avantages qu'elle confère sont d'autant plus bénéfiques. Ainsi, voici une liste basée sur plusieurs auteurs (Susarla *et al.*, 2002; Anselmo & Jones, 2005; Vishnoi & Sriatasva, 2008; Procópio *et al.*, 2009; Delgadillo-López *et al.*, 2011), qui démontre son potentiel d'utilisation:

1. En étant une technique hautement utilisée de manière *in situ*, la phytoremédiation, comparativement aux autres techniques d'extraction du substrat (*ex situ*), à une perturbation minime dans l'environnement où elle est réalisée.
2. Elle est la technique la moins coûteuse des processus de remédiation.
3. Elle est aussi la plus simple d'application.
4. Elle ne nécessite aucun personnel spécialisé pour son fonctionnement, seules les pratiques agronomes conventionnelles doivent être employées.
5. Elle peut s'appliquer sur des terres éloignées et difficiles d'accès.
6. Aucune énergie supplémentaire n'est nécessaire ou ne doit être incorporée au système pour son fonctionnement.
7. Elle peut traiter de nombreux polluants simultanément, qu'ils soient organiques ou inorganiques.
8. Lorsque les plantes ont traité les polluants et qu'aucune manipulation subséquente n'est nécessaire, de la biomasse est incorporée à l'environnement.
9. Les conditions physico-chimiques du sol sont maintenues ou améliorées grâce à la couverture végétale créée.

10. D'autres procédés qui affectent la dégradation des sols, comme celui de l'érosion et de la désertification, peuvent également être réduits ou prévenus avec l'utilisation de la phytoremédiation.
11. Elle diminue la lixiviation des contaminants vers d'autres zones, dont les cours d'eau ou la nappe phréatique.
12. Il y a fixation d'azote atmosphérique (principalement par les légumineuses).
13. Elle peut être appliquée sur de grandes surfaces à traiter.
14. Les sites qui contiennent des contaminants peu toxiques peuvent être soumis à la phytoremédiation sur le long terme, comme avec les sels.
15. Elle permet le recyclage des ressources comme l'eau et la biomasse.
16. Enfin, la phytoremédiation est une technique qui est déjà hautement acceptée par la société.

## **2.5 Limites**

Malgré les nombreux avantages qu'elle confère, la phytoremédiation a toutefois quelques contraintes qui peuvent freiner son utilisation et son efficacité (Cuunningham *et al.*, 1996; EPA, 2000; Devinny *et al.*, 2005; Vishnoi & Srivastava, 2008; Procópio *et al.*, 2009; Maestri & Marmiroli, 2011). Ces limites se doivent d'être explicitées pour en arriver à une meilleure compréhension des problématiques auxquelles se heurte la phytoremédiation, et ce, dans le but que des solutions soient proposées pour en atténuer les désavantages et permettre une optimisation de l'utilisation de la méthode.

1. D'abord, la première contrainte à la phytoremédiation est que le contaminant doit se retrouver dans la zone racinaire des plantes pour être traité, sans quoi, il n'y a aucun effet. Pour cela, les plantes doivent être en mesure d'entraîner leurs racines jusqu'aux contaminants ou bien les contaminants doivent être déplacés jusqu'aux racines. De plus, il faut considérer la profondeur du système racinaire qui varie selon les espèces, les conditions climatiques et celles du sol. Les arbres, par exemple, peuvent étendre leurs racines jusqu'à environ 4,5 mètres, tandis que les espèces graminées peuvent le faire jusqu'à environ 1,2 mètre.
2. De plus, la phytoremédiation s'opère principalement dans les sols peu profonds, les ruisseaux et les eaux souterraines.
3. Dans le même ordre d'idées, les conditions climatiques ou saisonnières peuvent limiter la croissance des plantes et augmenter la période de temps pour la décontamination d'un site.
4. La phytoremédiation fonctionne mieux lorsque les sols sont faiblement à moyennement affectés par les contaminants. Ainsi, un site contenant de fortes concentrations de contaminants peut limiter la croissance des plantes et limiter son traitement par la phytoremédiation.

5. Une extraction des plantes doit être réalisée lorsque celles-ci accumulent le contaminant dans ses tissus sans les dégrader.
6. Les plantes, qu'elles soient natives, exotiques ou génétiquement modifiées, qui extraient les polluants du sol en les emmagasinant dans leurs tissus, comme lors de la phytoextraction, engendrent la possibilité que les contaminants entrent dans le réseau trophique de l'écosystème. Ceci peut nuire aux organismes qui s'en nourrissent comme les insectes et les oiseaux.
7. Le choix des plantes pour la décontamination des pesticides est ardu étant donné l'étendue du spectre d'action et la grande gamme de substances chimiques utilisée pour la fabrication de ces produits.
8. Enfin, la ressource biologique est encore largement inexploitée.

## **2.6 Caractéristiques et fonctions des plantes optimales**

La sélection des espèces végétales dans un contexte de remédiation des sols doit se faire en tenant compte de plusieurs caractéristiques et fonctions. Procópio *et al.* (2009) ont établi une liste de critères à laquelle les plantes sont soumises pour être choisies avant leur utilisation sur des sols contaminés: elles doivent posséder un système racinaire dense et profond; avoir un haut taux de croissance, de biomasse et d'exsudation racinaire; avoir une capacité transpiratoire élevée; être résistantes aux pathogènes et aux maladies; être adaptées aux conditions locales climatiques et aux conditions du sol; avoir une haute association microbienne et fongique; être facile à se procurer ou se multiplier facilement; finalement elles doivent être faciles à contrôler ou à éliminer après le traitement.

Évidemment, l'idéal serait de réunir toutes ces caractéristiques dans une seule espèce, dans le cas contraire, la plante devrait en posséder le plus possible (Procópio *et al.*, 2009). D'un autre côté, il est naturellement difficile de rencontrer une plante détenant toutes ces caractéristiques, c'est pourquoi il peut être envisageable d'utiliser plusieurs espèces de plantes dans le même milieu à traiter que ce soit simultanément ou encore une à la suite de l'autre (Miller, 1996). Selon Lemego & Vidal (2007), les propriétés les plus importantes pour la phytoremédiation reposent sur la croissance rapide des plantes, la production élevée de la biomasse, la compétition et leur tolérance au polluant ciblé, comme être halophyte lorsqu'il s'agit de retirer le sel du sol (Pequeno *et al.*, 2014). Avec ces quelques caractéristiques, une plante devrait être considérée pour la phytoremédiation.

## **2.7 Plantes natives, exotiques et modifiées**

Habituellement, les plantes natives sont préférées à celles qui ne le sont pas lors de l'implantation des techniques de phytoremédiation (EPA, 2000). Ces espèces comportent divers avantages d'un point de vue écologique et technique à cause de leur faible coût de maintien, mais aussi pour leur compatibilité à

l'environnement local (Devinny *et al.*, 2005). En effet, elles offrent de la nourriture et des habitats aux autres organismes de l'écosystème et elles sont adaptées aux conditions environnementales du milieu, comme le climat.

Les plantes natives peuvent également servir, en plus de décontaminer le sol, à restaurer un environnement dégradé (EPA, 2000). La restauration d'un écosystème est le processus de récupération d'un environnement perturbé, dégradé ou détruit. Il doit impliquer un ensemble d'espèces présent dans l'écosystème de référence, dont les espèces natives qui devraient se retrouver en plus grand nombre possible (SER, 2004). La revégétation naturelle peut s'effectuer sur des décennies, voir des siècles, car elle est dépendante du vent et des animaux qui transportent et dispersent les graines. Ainsi, la plantation de végétaux, lorsqu'elle est faite de manière appropriée sur les sites dégradés peut diminuer le temps que prendra l'écosystème à retrouver ses caractéristiques et sa diversité (EPA, 2000).

De plus, l'utilisation d'espèces natives limite l'introduction d'espèces exotiques dans un environnement déjà sensible (Devinny *et al.*, 2005). Après le traitement, les espèces exotiques peuvent s'établir sur le site contaminé, mais aussi se répandre dans les zones adjacentes, nuire aux espèces présentes originalement ou encore s'hybrider avec les espèces indigènes (Gressel & Al-Ahmad, 2005).

Aussi, dans certains cas, les plantes natives poussent naturellement sur des sols contaminés. Il faut alors déterminer si elles ne sont que tolérantes aux contaminants présents ou si elles participent aux processus de remédiation (EPA, 2000). Deux espèces indigènes d'Amérique du Sud, *Bidens pilosa* et *Plantago lanceolata*, ont été retrouvé poussant abondamment dans un site contaminé au cuivre à Caçapava do Sul, une ville brésilienne du Sud-Est de l'État du Rio Grande do Sul (Andreazza *et al.*, 2015). Après l'analyse de plusieurs facteurs, dont la croissance, l'absorption de plusieurs macros et micronutriments, le taux d'accumulation, etc., elles ont été évaluées ayant des caractéristiques hyperaccumulantes et ayant un bon potentiel d'utilisation pour l'assainissement de ce site (Andreazza *et al.*, 2015).

Dans d'autres circonstances, il est néanmoins envisageable d'utiliser des plantes qui ne sont pas natives à l'environnement qui doit être traité (EPA, 2000). L'utilisation d'espèces exotiques est possible lorsque la plante a été introduite dans l'environnement par le passé, est aujourd'hui considérée faisant partie du paysage et ne représente pas de risque à l'écosystème (EPA, 2000). Aussi, les plantes lorsqu'elles arrivent mal à se disperser dans la nature posent moins de risque à devenir des espèces envahissantes et à affecter l'écosystème. C'est le cas des plantes stériles et de celles dépendantes des cultures qui peuvent être employées dans un environnement qui ne leur ait pas natif (EPA, 2000).

Enfin, les plantes génétiquement modifiées peuvent également servir d'outils à la dépollution d'un site. Elles permettent d'atteindre des résultats souhaités plus rapidement et de manière sélective (EPA, 2000). Une diversité de gènes, provenant du milieu animal, microbien ou encore du monde végétal de la plante même ou d'autres espèces, peut être incorporée aux plantes dans le but d'augmenter leur performance dans la remédiation (Baunthiyal, 2014). Cette modification génétique est dépendante de la disponibilité des séquences de gènes, qui améliorent, modulent et changent le comportement et les aptitudes de la plante vis-à-vis le contaminant souhaité (Maestri & Marmiroli, 2011).

Des gènes augmentant le taux de croissance de la plante, des racines en profondeur ou encore de la biomasse en général peuvent être intégrés ou surexprimés (Maestri & Marmiroli, 2011; Baunthiyal, 2014). De plus, le taux d'absorption d'une substance par la plante peut être modifié, par, entre autres, la suppression des protéines transportant les polluants inorganiques (Pilon-Smits, 2005). Aussi, l'incorporation de gènes qui permettant la biodégradation par les enzymes, l'oxydation des métaux, augmenter la tolérance ou l'accumulation des contaminants, améliorer l'habileté des ions métalliques d'entrer dans les cellules de la plante sont d'autres exemples qui montrent la gamme de possibilités (Baunthiyal, 2014).

Les manipulations génétiques des organismes vivants et leur insertion dans les milieux naturels ouverts comportent plusieurs risques écologiques. Pour diminuer ces derniers, d'autres gènes peuvent être insérés dans les plantes, notamment pour prévenir la propagation des plantes modifiées, le flux génétique avec les espèces natives ou pour rendre les plantes transgéniques extrêmement sensibles aux modulations environnementales, dont la température (Baunthiyal, 2014). De plus, si l'espèce transgénique détient un désavantage dans ses aptitudes environnementales comparativement aux autres plantes lui faisant compétition dans l'environnement, elle ne devrait que se reproduire faiblement. L'insertion d'un gène renforçant son désavantage écologique limiterait également sa reproduction (Gressel & Al-Ahmad, 2005).

Malgré les mesures de prévention qui sont employées, un milieu non contrôlé ou non confiné est susceptible d'entraîner des conséquences néfastes sur l'environnement. Ainsi, il existe plusieurs risques potentiels auxquels l'écosystème fait face lorsque des plantes génétiquement modifiées sont employées en phytoremédiation: comme avec une espèce exotique, la dispersion non désirée d'une espèce transgénique, la compétition de celles-ci avec les espèces locales ou natives et la possibilité d'insérer du matériel génétique étranger dans les plantes sauvages par le croisement entre ces espèces en sont quelques exemples (Baunthiyal, 2014). Enfin, l'ingénierie génétique est faiblement acceptée publiquement, ce qui peut rendre son application difficile sur le terrain (Baunthiyal, 2014). De plus, malgré les recherches sur le sujet qui se font de plus en plus nombreuses depuis les dernières années (Maestri & Marmiroli, 2011), l'amélioration des aptitudes des plantes pour décontaminer un site reste laborieuse (Davis, 2006). En fait,

les mécanismes d'action doivent être connus en détail (Harms *et al.*, 2003). Cependant, la productivité des plantes est contrôlée par de nombreux gènes, ce qui rend cette tâche plus difficile (Pilon-Smits, 2005).

## **2.8 La phytoremédiation au Brésil**

Au Brésil, le terme de la phytoremédiation semble encore méconnu pour une grande partie de la communauté scientifique (Procópio *et al.*, 2009). De plus, la plupart des études concernant la phytoremédiation ont été effectuées dans les climats tempérés. Malgré tout, au Brésil, les recherches sur le sujet sont en constante évolution (Procópio *et al.*, 2009). Depuis les dernières années, les études concernant la phytoremédiation et son utilisation en agriculture ont été fortement stimulées (Belo *et al.*, 2016). Même, les investissements dans le traitement des déchets humains, agricoles et industriels ont augmenté étant donné les exigences de plus en plus élevées de la société et l'application de lois plus strictes (Dinardi *et al.*, 2003).

D'après une analyse de la littérature mondiale effectuée en 2016 dans les moteurs de recherches du *Web of Science* et de *Scopus*, le Brésil participait à seulement 4% des articles scientifiques publiés au cours des 20 dernières années qui traitaient de bioremédiation, biosorption et phytoremédiation. Malgré tout, il y aurait 190 groupes de recherche, dont des entreprises privées de l'État et des institutions académiques qui seraient liés à ces mots (Dinardi *et al.*, 2003), ainsi que 37 produits licenciés pouvant être utilisés en bioremédiation (Labuto & Carrilho, 2016). Une autre étude effectuée en 2009 avait retracé, seulement pour le mot clé «phytoremédiation» 225 doctorats et 259 études au niveau maîtrise, baccalauréat ou technique qui étaient liés au *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq), un organisme fédéral brésilien. Ces résultats montrent l'évidence de l'intérêt croissant pour ce thème (Marques *et al.*, 2011).

Enfin, le pays avec sa grande biodiversité florale détient un fort potentiel à l'utilisation des procédés liés à la phytoremédiation (Procópio *et al.*, 2009; Marques *et al.*, 2011), car comme mentionné au premier chapitre, pour le biome de la Caatinga seul, il y a plus de 1 500 espèces recensées (Gariglio *et al.*, 2010). Ainsi, la variété de plantes et de caractéristiques spécifiques favorables pour l'implantation de la phytoremédiation dans le Sertão sont grandes. Il est clair que les technologies les moins dispendieuses, comme c'est le cas de la phytoremédiation, sont propices à leur développement et à leur succès (Dinardi *et al.*, 2003).

### **2.8.1 Phytoremédiation des sols contaminés aux pesticides**

La complexité de la phytoremédiation des composés organiques des pesticides est plus grande qu'avec les composés inorganiques comme ceux mentionnés précédemment et qu'avec les métaux lourds, dont le



zinc, le plomb, le cuivre, etc. En fait, la grande diversité de molécules chimiques fabriquées par l'Homme et leur constante transformation dans l'environnement rendent les recherches sur le sujet plus complexes. En fait, la majorité des composés organiques subissent une transformation dans les cellules végétales (Salt *et al.*, 1998). De ce fait, ils ont la possibilité de former des métabolites secondaires, ce qui n'est pas le cas avec, par exemple, les métaux lourds qui sont alors plus facilement quantifiables (Pires *et al.*, 2003). Les recherches sur les contaminants organiques doivent être spécialisées et peuvent être dispendieuses, car elles nécessitent du matériel analytique spécifique (Pires *et al.*, 2003). Néanmoins, plusieurs études relatent des conclusions favorables vis-à-vis l'utilisation de plantes pour décontaminer les sols au Brésil et de la région semi-aride.

D'abord, le tébuthiuron est principalement connu pour être utilisé dans les cultures de cannes à sucre, mais son usage peut également servir contre les ravageurs des cactus fourragers (*Opuntia* et *Nopalea*) des espèces largement cultivées dans le Sertão (IPA, 2002). Plusieurs plantes ont été testées pour leur efficacité à retirer cet herbicide du sol. En fait, après l'application du tébuthiuron à différentes concentrations sur plusieurs espèces de plantes, *Crotalaria juncea*, une plante ayant servi de bioindication à ce pesticide, avait une meilleure croissance après le traitement avec *Pennisetum typhoides*, *Stizolobium aterrimum*, *Canavalia ensiformis* et *Cajanus cajan* jusqu'à des doses de 0,5 kg ha<sup>-1</sup>. À des doses d'un kg ha<sup>-1</sup>, seulement *C. ensiformis* et *C. cajan* étaient favorables à la croissance de *C. juncea* (Pires, 2008). Le genre *Pennisetum* est utilisé pour les cultures fourragères dans les basses terres du Sertão (Sabourin, 2001). *S. aterrimum* est également cultivée dans la région, souvent en association avec d'autres légumineuses (Monteiro *et al.*, 2013; Giongo *et al.*, 2018) et *C. cajan* est cultivée comme plante fixatrice d'azote, engrais, plante fourragère et aliment humain, se développant bien dans des conditions climatiques avec de faibles précipitations et des températures élevées (Souto *et al.*, 2009).

*Stizolobium aterrimum* a également été utilisé pour évaluer ses capacités de décontamination du trifloxysulfuron-sodium. Ce dernier étant un herbicide employé principalement dans les cultures de cannes à sucre, du coton et de tomates pouvant affecter, par lixiviation, d'autres cultures comme celle du haricot ou du soja (Belo, 2006). Une étude effectuée dans l'état du Minas Gerais dans un Argisol rouge-jaune à texture sableuse et argileuse a montré que l'espèce était efficace pour la décontamination de cet herbicide (Procópio *et al.*, 2005). En effet, après la croissance de la plante durant une période de 65 jours à une dose de 15 g ha<sup>-1</sup>, elle a été retirée pour laisser place au cultivar *Phaseolus vulgaris*. Après 54 jours de croissance, il a été évalué que celui-ci a poussé de manière similaire dans les sols qui ont préalablement été plantés avec *S. aterrimum* (Procópio *et al.*, 2005), tandis que dans les sols où il n'y a pas eu le traitement avec *S. aterrimum*, *P. vulgaris* avait une croissance plus faible (Procópio *et al.*, 2005).

*Ricinus communis*, une *Euphorbiaceae* largement cultivée dans le Nord-est du Brésil et particulièrement dans le semi-aride (Dutra *et al.*, 2015), est également intéressante d'un point de vue de la décontamination des sols. Dans une étude effectuée en milieu contrôlé avec un sol obtenu à proximité de la ville de Bauru dans l'état de São Paulo, l'efficacité de dégradation de *Ricinus communis* a été testée avec 15 pesticides considérés comme des polluants persistants dans l'environnement (HCH:  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$ , chlorpyrifos, l'heptachlore, l'aldrine, l'époxyde d'heptachlore, le dieldrine, le trans-chlordane, DDT et ses métabolites (DDE et DDD), l'endrine, le diclofop-méthyle, et le méthoxychlore) (Rissato *et al.*, 2015). Après 66 jours de traitement, ce sont les HCH, le chlorpyrifos, le diclofop-méthyle et le trans-chlordane qui ont eu le plus de succès pour la phytoremédiation. L'étude a montré que plus un composé est hautement hydrophobe, plus il a tendance à se concentrer dans les racines de la plante (Rissato *et al.*, 2015). Aussi, en plus de sa tolérance à la sécheresse (Beltrão *et al.*, 2010), l'espèce à l'étude peut aider à réduire l'érosion et restaurer le site dégradé, tout en étant facile à cultiver (Rissato *et al.*, 2015). *R. communis* permet de créer des emplois, car elle nécessite une grande quantité de travail manuel, elle est donc appropriée pour les petits producteurs et de ce fait peut améliorer les conditions de vie des petits agriculteurs qui y travaillent (Lopes & Neto, 2011). La plante peut également être utilisée par la suite comme biocarburant (Lopes & Neto, 2011).

En revanche, lors d'une étude effectuée en milieu contrôlé dans un Neosol Regolithique argileux de l'état de Paraíba, *R. communis* s'est montré vulnérable face à l'herbicide trifloxysulfuron sodium. Les plantes en présence de celui-ci, à des doses de 5,0; 7,5; 10,0 et 12,5 g ha<sup>-1</sup> avaient une croissance plus faible et une biomasse sèche moins importante que les plants témoins (Ferreira *et al.*, 2009).

Un autre herbicide, l'ametryn, qui est appliqué avant et après l'émergence de «mauvaises herbes» dans le but de les contrôler, fait partie du groupe des triazines qui sont utilisés dans les cultures de canne à sucre, d'ananas, de cotons, de bananes, de cafés, d'agrumes, de maniocs, de maïs et de raisins (IBAMA, 2009). Une étude à Mossoró, Rio Grande do Norte, effectuée en serre dans des pots contenant un sol argileux et sableux à un pH de 7,20 a permis d'évaluer que jusqu'à des doses de 1000 g i.a ha<sup>-1</sup> *C. ensiformis* était tolérante à l'ametryn. Tandis que *C. cajan* et *Brachiaria decumbes* l'étaient jusqu'à des doses de 2000 g i.a ha<sup>-1</sup> (Cortez, 2007). En fait, ce sont 27 espèces de plantes qui ont été testées sous ces conditions et seulement ces trois ont démontré leur capacité à tolérer l'herbicide. De plus, il a été évalué, peu importe la dose, que la hauteur des plants et l'aire foliaire de *C. cajan* et *B. decumbens* n'ont pas été affectées par l'application de l'ametryn. En conclusion, l'auteure propose l'inclusion de ces trois espèces dans des programmes de phytoremédiation de l'herbicide en question (Cortez, 2007).

Maladão *et al.* (2013), quant à eux, ont évalué, par une étude effectuée en serre dans le Nord de Minas Gerais, huit espèces de plantes soit, *Calopogonium mucunoides*, *Crotalaria breviflora*, *C. juncea*, *C.*

*ensifomis*, *Dolichos lablab*, *Stizolobium deeringianum*, *S. aterrimum* et un hybride du sorgho (*Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanense*) sous différentes doses (0, 200, 400, 800 et 1 600 g ha<sup>-1</sup>) de l'herbicide sulfentrazone. Ce dernier étant utilisé dans les cultures de cannes à sucre, de café, de soja et d'agrumes (Blanco *et al.*, 2010). Le sol à l'étude avait un pH de 5,6 et détenait une texture argileuse et sableuse. Les résultats obtenus ont montré que *D. lablab*, *C.ensifomis* et *C. juncea* représentaient le moins de symptômes de phytotoxicité en plus d'avoir les valeurs de hauteur de plantes les plus élevées, ainsi que la plus grande accumulation de matière sèche des parties aériennes et souterraines. Les résultats étaient meilleurs lorsque l'herbicide avait une concentration de 400 g ha<sup>-1</sup> (Maladão *et al.*, 2013).

*C. juncea* était également l'espèce qui représentait la meilleure capacité de remédiation du sulfentrazone dans une autre étude effectuée en serre dans un sol jaune argileux, jusqu'à une dose de 400 g i.a. ha<sup>-1</sup>. Les deux autres espèces étudiées, *C. cajan* et *C.ensifomis*, représentaient également une capacité de remédiation du contaminant, mais à un niveau moins important (Madalão *et al.*, 2012). Quant à *D. lablab*, qui est décrite dans l'étude de Maladão *et al.* (2013) comme ayant un potentiel pour la phytoremédiation du sulfentrazone, l'était moins lorsqu'elle était en présence de tebuthiuron, et ce, même à des doses de 0,5 kg ha<sup>-1</sup> (Pires *et al.*, 2008).

D'autres études encore ont été effectuées concernant la phytoremédiation en sol brésilien. Braga *et al.*, (2016), par exemple, ont déterminé que l'espèce fourragère *Brachiaria brizantha*, originaire des savanes africaines, mais utilisée dans la région semi-aride pouvait décontaminer les sols contenant l'herbicide picloram (IBAMA, 2009). Les résultats ont montré que la *Poaceae* était plus performante en surface du sol et lorsque celui-ci avait un pH faible, soit de 4,5, comparativement à un pH plus élevé de 5,6 (Braga *et al.*, 2016).

En résumé, les recherches ont montré le potentiel de plusieurs espèces de plantes à décontaminer le sol de différents pesticides (Tableau 2.2) et leur efficacité semble prometteuse. Néanmoins, la majorité des pesticides étudiés ne concernent que le groupe des herbicides et malgré leur polyvalence, la plupart sont utilisés principalement dans les cultures de cannes à sucre. De plus, les plantes employées sont naturalisées, mais non endémiques ou natives du biome de la Caatinga. Aussi, lorsqu'une plante est efficace dans le traitement d'un herbicide, elle ne l'est pas forcément dans le traitement d'un autre et peut même y être sensible. Ceci indique qu'il y a une grande spécificité entre la plante et l'herbicide. Quelques plantes ressortent du lot des espèces testées pour leur efficacité en phytoremédiation, dont *D. lablab*, *C. cajan*, *C.ensifomis* ou *C. juncea*. Enfin, l'immense quantité de pesticides sur le marché et l'intérêt croissant de la communauté scientifique brésilienne à la phytoremédiation entraînent également de nouveaux développements dans le domaine: les recherches se poursuivent.

**Tableau 2.2 Espèces de plantes et pesticides associés pouvant être décontaminés**

Plantes phytoremédiantes	Pesticides
<i>Brachiaria brizantha</i>	Picloram
<i>Brachiaria decumbes</i>	Ametryn
<i>Cajanus cajan</i>	Ametryn, Sulfentrazone, Tébutiuron
<i>Canavalia ensiformis</i>	Ametryn, Sulfentrazone, Tébutiuron
<i>Crotalaria juncea</i>	Sulfentrazone
<i>Dolichos lablab</i>	Sulfentrazone
<i>Pennisetum typhoides</i>	Tébutiuron
<i>Ricinus communis</i>	Chlorpyrifos, Diclofop-méthyle, HCH ( $\alpha$ , $\beta$ , $\delta$ ), Trans-chlordane
<i>Stizolobium aterrimum</i>	Tébutiuron, Trifloxysulfuron-sodium

### 2.8.2 Phytoremédiation des sols contaminés par la salinisation

Vis-à-vis la problématique de la salinité des terres de la région semi-aride au Brésil qui a été illustrée au chapitre précédent, des recherches ont également été effectuées dans le domaine de la phytoremédiation. Elles avaient comme objectif de déterminer la possible application de certaines espèces de plantes capables de faire face aux conditions environnementales et climatiques de la région semi-aride. Cette section détaille les résultats de ces études, effectuées dans le Sertão et qui concernent plusieurs espèces de plantes à l'aptitude rémédiatrice de terres salines.

D'abord, une plante qui a un bon potentiel pour la phytoremédiation des sols salins du Sertão est sans doute *Atriplex nummularia*. Cette plante, de la famille des *Chenopodiaceae*, est originaire d'Australie, cependant elle s'est très bien adaptée aux climats arides et semi-arides d'Amérique du Sud, dont celui du Nord-est du Brésil (Porto & Araújo, 1999). En fait, au Brésil, elle aurait été introduite dans les années 1940 dans le but d'être utilisée dans des travaux de recherches scientifiques et est aujourd'hui considérée comme une plante commune. Les conditions climatiques du Sertão lui sont favorables, par exemple au Pernambuco, elle se développerait bien dans la majorité des régions, car elles ont des températures supérieures à 24°C et des précipitations sous les 1 200 mm de pluie, conditions idéales pour cette plante (Rodrigues *et al.*, 2017).

La particularité d'*A. nummularia* est qu'elle est une plante halophyte et hyperaccumulatrice de sodium (Leal *et al.*, 2008). Ceci lui a également valu le nom populaire d'*erva sal* (herbe salée). Elle ne possède pas de mécanisme d'exclusion du sel et c'est pour cette raison qu'elle l'intègre dans ses tissus (Araújo *et al.*, 2006). Le sel, une fois absorbé, est envoyé directement dans les feuilles et ne s'accumule pas dans les racines (Leal *et al.*, 2008). Il se retrouve alors concentré dans des vésicules localisées à la surface du tissu foliaire (Porto *et al.*, 2001). De plus, l'absorption de sodium est plus importante lorsque le système

racinaire est bien développé (Leal *et al.*, 2008). En fait, le genre *Atriplex* possède un système racinaire composé d'une racine principale qui peut se développer profondément dans le sol, selon les spécificités de chacun des sites. Des racines latérales sont également présentes et permettent la nutrition et la stabilité de la plante (IPA, 2004).

En ce qui a trait à sa croissance, Araújo *et al.* (2006) ont trouvé, dans leur étude effectuée dans un environnement contrôlé de la ville de Fortaleza dans l'état du Ceará, que la production de la biomasse des feuilles augmente jusqu'à 300 mM de NaCl. Même que pour sa croissance, elle aurait besoin de cet élément qui est considéré comme un macronutriment (Araújo *et al.*, 2006). Cependant à des taux plus élevés, comme à 600 mM de NaCl, la croissance est plus faible que celle des plantes n'ayant pas été soumises à ces mêmes taux (Araújo *et al.*, 2006).

Quant aux capacités d'extraction d'*A. nummularia*, Santos (2012) a réalisé une étude à aire ouverte sur le périmètre irrigué de Cachoeira II, dans la municipalité de Serra Talhada au Pernambuco. Le sol de la zone à l'étude était un Cambisol fluvial classifié salin-sodique (Fernandes, 2009). Des parcelles représentant 10 000 plantes ha<sup>-1</sup> (1 m x 1 m) et 2 500 plantes ha<sup>-1</sup> (2 m x 2 m) ont été échantillonnées. Pour chacun des traitements, 1 m x 1 m et 2 m x 2 m respectivement, le chlore était l'élément extrait en plus grande quantité par la plante (388,55 et 232,66 kg ha<sup>-1</sup>), suivi du sodium (339,46 et 198,58 kg ha<sup>-1</sup>), du calcium (105,42 et 88,59 kg ha<sup>-1</sup>), du potassium (47,89 et 18,14 kg ha<sup>-1</sup>) et finalement du magnésium (12,15 et 8,27 kg ha<sup>-1</sup>). Après le traitement, les analyses de sol ont montré que les quantités de ces éléments avaient diminué. De plus, l'élagage des plantes durant l'étude s'est avéré utile pour stimuler la croissance des plantes et ainsi augmenter leur biomasse. Après les 18 mois d'expérimentation, la biomasse sèche des plantes était de 12,54 et de 7,33 Mg ha<sup>-1</sup> pour les traitements à 10 000 et 2 500 plantes ha<sup>-1</sup> respectivement (Santos, 2012).

Miranda (2013) a également obtenu des résultats prometteurs avec l'application d'*A. nummularia*. L'étude a été réalisée sur le périmètre irrigué de la municipalité de Custódia au Pernambuco. Le sol était aussi à l'état de dégradation à cause de sa condition saline et sodique. Le pH du sol démontrait une grande amplitude de valeurs, avec une tendance alcaline. Le Na<sup>+</sup> était l'élément le plus abondant du sol (avec des teneurs plus élevées dans la couche la plus profonde à l'étude, soit de 30 cm à 60 cm) et de l'eau, reflétant un risque modéré de toxicité pour les plantes. Néanmoins, le traitement avec *A. nummularia* a permis de réduire les teneurs en sels, des couches superficielles à profondes, particulièrement du Na<sup>+</sup> et du Cl<sup>-</sup> et de modifier les propriétés physiques du sol, en augmentant la conductivité hydraulique, la macroporosité et la réduction à la pénétration. *A. nummularia* a également permis de favoriser la couverture végétale et de ce fait, protéger le sol de la dégradation (Miranda, 2013).

Porto *et al.*, (2001) quant à eux, ont cultivé *A. nummularia* durant un an sur un terrain de la station expérimentale de l'*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Semi-Árido* (Embrapa) où les rejets d'eau des dessalinisateurs étaient utilisés pour l'irrigation. Ils ont évalué que 1 145 kg de sel ha<sup>-1</sup> par an peut être retiré par la plante pour une eau avec une salinité équivalente à 11,38 dS m<sup>-1</sup>. Les feuilles accumulaient la majeure partie, soit 864 kg ha<sup>-1</sup> par an et la production totale de matière fraîche était de 26 064 kg ha<sup>-1</sup> considérant une densité de 1 111 plantes ha<sup>-1</sup>. Il a également été observé par Leal *et al.* (2008) que l'ajout de gypse lors du traitement avec *A. nummularia* augmentait la capacité de cette dernière à extraire le sodium du sol. En fait, ce serait 370 kg de sel ha<sup>-1</sup> par an qui pourrait être extrait de plus avec le gypse (Leal *et al.*, 2008).

En plus d'*A. nummularia*, *Mimosa caesalpinifolia*, *Leucaena leucocephala* et *Azadirachta indica*, trois espèces fréquemment rencontrées dans la région semi-aride du Nord-est et acceptées par la population rurale, ont été évalué dans le but de déterminer leur potentiel pour être utilisé dans les processus de phytoremédiation des sols salins (Santos, 2016b). Dans une étude réalisée dans le semi-aride du Pernambuco sur un sol dégradé, abandonné depuis plusieurs années et sans présence de sels excessifs, les plantes ont été testées dans le but de connaître leur potentiel d'extraction. Avec l'évaluation du pourcentage de sodium échangeable (PSC), les résultats ont montré qu'après 18 mois de traitement, il y a eu une diminution du sodium dans les parcelles où les espèces étaient plantées. Le PSC représentait une réduction de 65,65% pour *A. nummularia*, 30,36 % pour *M. caesalpinifolia*, 26,75 % pour *A. indica* et 10,84% pour *L. leucocephala*. La lixiviation des composés et la conductivité électrique ont également diminué après le traitement. De plus, à la fin de l'étude, les niveaux de sels en superficie du sol étaient plus faibles que dans les couches en profondeur, ceci étant possiblement causé par l'absorption de ces éléments par les plantes (Santos, 2016b).

Encore d'autres espèces ont été étudiées pour déterminer leur effet rémédiateur sur les minéraux, en excès dans le sol. Dans un système protégé, *Pennisetum americanum*, une *Poaceae* largement retrouvée dans la région semi-aride (Vier, 2013), a été évaluée pour ses propriétés phytoremédiantes (Silva *et al.*, 2016b). Elle a démontré son efficacité dans l'extraction du calcium et du magnésium (Silva *et al.*, 2016b). De plus, c'est une plante intéressante, car c'est aussi une espèce à croissance rapide qui peut développer une grande phytomasse dans les sols sableux et pauvres en nutriments (Vilela, 2009).

L'espèce *Medicago sativa*, appartenant à la famille des *Fabaceae*, peut également extraire efficacement le calcium et le magnésium du sol à l'aide de son système racinaire pivotant qui peut atteindre des profondeurs entre deux et cinq mètres (Silva *et al.*, 2016b). Selon Pompeu *et al.* (2003) et Oliveira *et al.* (2014), l'espèce présente une bonne adaptabilité aux conditions de la région semi-aride où elle pourrait être cultivée. Même, certains cultivars (SW9301, P30, Vitória SP INTA, SW7400, Esmeralda SP INTA

et F686) ont montré une production de matière sèche supérieure à celle obtenue dans d'autres régions du Brésil qui ne comportent pas ces conditions climatiques (Pompeu *et al.*, 2003). Enfin, les possibilités de remédiation des sols salins par les plantes dans la région semi-aride sont nombreuses et les recherches sur plusieurs espèces montrent des résultats concluants.

Les paramètres entourant la décontamination des sols par les plantes et les connaissances scientifiques pertinentes actuelles sur le sujet ont été mis en lumière. Les études sur l'utilisation de la phytoremédiation sur les terres de la région semi-aride brésilienne, qui ont des taux élevés soit de pesticides ou de sels ont été exposées. Ainsi, c'est suite à ce regroupement d'informations que le chapitre suivant permettra de valider la technique. Il tiendra compte des aspects importants reliés à une bonne gestion des ressources naturelles et humaines qui concernent particulièrement les petits et moyens propriétaires de terres.

## **Chapitre 3**

### **Analyse de faisabilité pour l'implantation de la phytoremédiation dans le Sertão**

Le dernier chapitre consiste en une analyse pluridimensionnelle de l'implantation de la phytoremédiation dans le Sertão. Plus précisément, c'est à la suite de cette analyse qu'il sera possible de déterminer si les conditions de la région semi-aride du Brésil sont favorables à ce que cette technique de décontamination des sols soit une solution viable et durable pour les propriétaires de petites et moyennes terres. Ainsi, dans un premier temps, les analyses de faisabilités technique, organisationnelle, environnementale, financière, légale, sociale et environnementale sont détaillées. Finalement, des recommandations applicables spécifiquement à la région sont décrites dans le but de valoriser et améliorer les conditions entourant la phytoremédiation dans la région semi-aride du Brésil.

#### **3.1 Analyses de faisabilités**

L'étude de faisabilité présentée dans cette section permet de s'interroger sur l'intérêt et la viabilité de l'implantation de la phytoremédiation dans le Sertão. Avec ces différents niveaux d'analyses, il est possible de traiter plusieurs aspects du sujet et d'évaluer la possibilité d'atteindre les objectifs souhaités (Corriveau, 2012). De plus, ces analyses permettent d'identifier les difficultés et les contraintes qui s'opposent à l'efficacité de la réalisation d'un tel projet (Genest & Nguyen, 2010). Des solutions peuvent être proposées pour limiter les difficultés rencontrées ou, s'il n'est pas possible de les surmonter, déterminer si elles sont acceptables. Aussi, l'étude de faisabilité permet d'évaluer la disponibilité ou de quelle manière se procurer les ressources intellectuelles, matérielles, monétaires, humaines et déterminer le cadre juridique, ainsi que les enjeux sociaux et environnementaux qui peuvent influencer les décisions. Enfin, pour obtenir une vision positive de la pratique étudiée, les avantages qu'elles soient financières ou sociales doivent être supérieurs au temps et aux coûts de mise en application (Genest & Nguyen, 2010).

##### **3.1.1 Analyse technique**

L'analyse de faisabilité technique fournit les informations relatives au savoir-faire et aux ressources matérielles requis pour la réalisation d'un projet. Avec ce type d'analyse, il est possible de vérifier la technologie disponible et s'il y a un apprentissage de nouvelles méthodes qui est nécessaire. En connaissant les ajouts techniques possibles, il est ensuite envisageable d'évaluer les coûts supplémentaires associés (Genest & Nguyen, 2010).

En premier lieu, dans les régions détenant un climat de type aride ou semi-aride, l'implantation de la phytoremédiation nécessite la sélection de plantes spéciales pour son succès. Les régions humides seraient plus propices à ce type de processus que les autres régions où la croissance des plantes est moins



favorable. Ainsi, il est vrai que les études concernant la phytoremédiation dans ces habitats sont encore à optimiser pour améliorer le savoir dans le domaine (Mendez & Maier, 2007; Padmavathiamma *et al.*, 2014).

Aussi, il a été démontré que la région semi-aride du Brésil présente un assemblage d'écosystèmes complexes qui concernent les différents types de sols, de climats, de végétations, de disponibilité de l'eau, de pratiques agricoles, etc. (Suassuna, 1996). Ainsi, par le simple fait de l'hétérogénéité de la région, l'implantation de la phytoremédiation peut être une tâche ardue, car tous les composants de l'écosystème influencent la manière dont les plantes interagissent avec leur environnement. Les espèces ayant évolué avec le climat associé seraient les meilleures candidates, car elles possèdent les adaptations adéquates pour survivre dans cet environnement (Padmavathiamma *et al.*, 2014). Ainsi, un travail de sélection des plantes est essentiel pour le bon fonctionnement de la phytoremédiation.

Jusqu'à présent, les études disponibles sur les pesticides et la salinisation concernent principalement quelques plantes à usage agricole, mais elles ne sont pas forcément natives de la région, et ce, malgré que certaines d'entre elles, comme c'est le cas pour *A. nummularia*, se sont bien adaptées au Sertão (Porto & Araújo, 1999; Rodrigues *et al.*, 2017). Presque aucune étude ne porte sur les plantes natives ou indigènes de la région et qui pourraient servir de plante remédiate. Dans la région du Cerrado, des recherches ont été entamées pour explorer le potentiel remédiateur des plantes natives de ce biome et les résultats obtenus sont prometteurs (Lopes, 2010; Santos & Novak, 2013). En ce qui a trait au biome de la Caatinga, les connaissances, mêmes générales de cet écosystème sont encore faibles. Comme mentionné dans le premier chapitre, la Caatinga fait partie des biomes qui ont été les moins étudiés du Brésil (Santos *et al.*, 2011). Ainsi, le savoir technique concernant la phytoremédiation et son application dans une telle région gagnerait à être exploré davantage.

Le deuxième chapitre a tout de même permis de faire ressortir de la littérature plusieurs espèces de plantes utilisables dans le semi-aride. Celles-ci ont déjà été testées soit en milieux contrôlés, comme dans des serres, soit directement dans les terres et sont prometteuses pour leur efficacité à remédier les sols contaminés aux pesticides ou affectés par les processus de la salinisation. En fait, de manière générale, la phytoremédiation peut être employée pour décontaminer le sol d'une grande variété de substances, organiques ou inorganiques et est donc très polyvalente (Warrier, 2012). Par contre, il faut noter que la majorité des études effectuées qui concernent les pesticides traitent seulement d'une partie de tous les composés existants et utilisés dans la région à l'étude.

De plus, la grande diversité de composés chimiques créée par l'Homme ne permet pas de connaître toutes les plantes qui sont efficaces dans la détoxification de chacune des substances, d'autant plus que la

création des produits utilisés en agrochimie est en constante transformation et que de nombreuses substances sont développées régulièrement (Londres, 2011). Ainsi, le marché avance rapidement et les études associées peuvent prendre du temps. En conséquence, sachant que la phytoremédiation au Brésil est une technique émergente, de nombreuses informations ne sont pas encore accessibles. Les agriculteurs peuvent également devenir dépendants des produits offerts par l'industrie des pesticides, qui sont constamment substitués par de nouveaux produits plus efficaces, les laissant constamment dans un cercle vicieux de consommation de nouveaux produits (Londres, 2011).

Aussi, les agriculteurs n'utilisent pas forcément les produits agrochimiques de la bonne manière. Ils peuvent employer différents pesticides, des mélanges de ceux-ci ou encore appliquer des pesticides illégaux (Londres, 2011). De plus, le lessivage peut entraîner les pesticides à d'autres endroits dans le sol ou la nappe phréatique (Gamma *et al.*, 2013). Il est donc difficile de connaître l'historique de l'utilisation des pesticides et ce qui se retrouve réellement dans le sol. Des analyses spécifiques doivent être faites, ce qui nécessite du temps et de l'argent (ITRC, 2009).

Ce qui est toutefois intéressant avec la phytoremédiation c'est qu'elle ne requiert pas beaucoup de matériel. Considérant la précarité financière des habitants du Sertão, ceci est un avantage majeur dans l'établissement d'un projet. Les plantes, elles-mêmes, constituent le plus gros du matériel. Elles peuvent être achetées ou multipliées directement sur le terrain (Procópio *et al.*, 2009). Dans cette dernière situation, il faut s'assurer qu'elles ne comportent pas de risque environnemental (EPA, 2000).

Le système agropastoral, bien ancré dans le paysage semi-aride du Brésil peut constituer un avantage dans le contexte de la phytoremédiation. Les plantes ayant extrait et emmagasiné les sels dans leurs tissus peuvent être données comme nourriture au bétail. En fait, *A. nummularia* est déjà largement utilisée comme ressource fourragère dans la diète des ruminants (Porto & Araújo, 1999), car elle est riche en protéines et en carotène (IPA, 2004). Dans le Sertão, la gestion des troupeaux de bétail est liée au type, à la qualité et la quantité de fourrage qui est produit dans les champs (IPA, 2004). Compte tenu des conditions climatiques du semi-aride et des caractéristiques d'*A. nummularia*, cette dernière est une solution intéressante pour son usage dans les sols qui sont aux prises avec des problèmes de salinisation, car du même coup elle peut servir d'aliment pour les animaux d'élevage.

Les plantes retirant les pesticides du sol sans les dégrader posent cependant un risque de contamination chez les animaux d'élevage (Mello & Silveira, 2012). D'ailleurs, en 2010, des organophosphorés et des carbamates ont été retrouvés dans les tissus d'une vingtaine de bovins morts à la suite d'une intoxication à ces pesticides (Oliveira-Filho *et al.*, 2010). Les sous-produits tirés des animaux d'élevage peuvent également être contaminés, c'est le cas notamment du lait cru et du fromage qui ont été analysé comme

contenant plusieurs pesticides (organochlorés, organophosphorés, carbamates, etc.) dans la majorité des échantillons testés dans des études effectuées au Brésil (Santos *et al.*, 2006; Nero *et al.*, 2007). Pour surmonter ce problème, les parcelles à décontaminer devraient être délimitées et inaccessibles au bétail, et ce tout au long du traitement.

Enfin, même si le savoir concernant la phytoremédiation dans les régions semi-arides et arides est moins grand que dans les autres régions du monde, il existe des guides techniques de prises de décisions qui peuvent être appliqués au Sertão. En fait, l'Agence de protection environnementale des États-Unis (EPA) a déjà établi les processus à suivre lors de l'élaboration, la planification et la réalisation de projets en phytoremédiation. Elle offre un guide complet contenant les lignes directrices, les questions qui doivent être posées et les démarches à suivre pour aller de l'avant avec de tels projets. Ceci permet donc de prendre les décisions adéquates, sans oublier d'étapes de réalisation (ITRC, 2009).

### **3.1.2 Analyse organisationnelle**

L'analyse organisationnelle pour sa part, valide la disponibilité des ressources humaines. L'expertise nécessaire pour mener à bien le projet et livrer une qualité appropriée est déterminée dans cette section (Corriveau, 2012). L'organisation structurelle, le mode de fonctionnement et les règles sont coordonnés. C'est également avec l'analyse organisationnelle que les paramètres de suivi et le contrôle du projet sont élaborés (Corriveau 2012).

D'abord, pour qu'un projet en phytoremédiation soit réalisé, il faut l'action conjointe de plusieurs professionnels provenant de différents domaines (Vieira *et al.*, 2011). Le savoir-faire requis se divise en plusieurs expertises. En fait, les experts de la phytoremédiation détiennent les connaissances pour gérer et élaborer la planification de la mise en œuvre de la décontamination d'un site. D'autres professionnels connaissent les plantes propices à la décontamination et d'autres sont familiers avec l'environnement physique ou social en conditions particulières semi-arides (Pires *et al.*, 2003).

Avec l'augmentation des études au sujet de la phytoremédiation dans le semi-aride, les universités et les centres de recherche doivent être approchés pour obtenir leur participation à la mise en place de projets à l'échelle de la propriété privée. Embrapa Semi-Árido est un acteur clé dans le domaine. Il est lié au MAPA et œuvre pour la durabilité des systèmes de production agricole, de l'agriculture et des ressources naturelles, spécifiquement dans la région semi-aride. À ce jour, d'après une recherche sur leur site internet, 49 articles scientifiques sur le thème de la phytoremédiation ont déjà été publiés par Embrapa qui travaille avec les chercheurs de différentes universités brésiliennes (Embrapa, 2018).

Au Brésil, mis à part les institutions, plusieurs entreprises travaillent à la remédiation des sols: Clean Environment Brasil, OXI Ambiental, TSL Engenharia-Manutenção e Meio Ambiente, etc., mais encore peu oeuvrent dans le domaine spécifique de la phytoremédiation (Marques *et al.*, 2011). C'est le cas notamment de Phytorestore installée à São Paulo qui offre ses services de décontamination du sol, de l'eau et de l'air avec leur système de jardins filtrants. La compagnie vise le respect de l'environnement, en tenant compte des valeurs sociales, économiques et paysagères, par l'emploi d'une main-d'œuvre locale, de faibles coûts de production et l'enrichissement de l'écosystème local (Phytorestore, 2016).

Les événements rassembleurs sont également un bon moyen pour renforcer les liens entre les différentes parties travaillant en phytoremédiation ou dans les sphères reliées. La *Reunião Nordestina de Ciência do Solo* (RNCS), est un événement technique et scientifique qui a lieu chaque année et qui s'organise autour d'universités, d'entreprises et de centre de recherches (SBCS, 2016). Elle vise l'approfondissement des discussions et des solutions en ce qui a trait aux problèmes des sols et a comme but d'encourager une agriculture durable. Les thèmes de la pollution, de la remédiation et de la récupération des aires dégradées y sont abordés. Le coût d'entrée pour un producteur rural est de seulement 70 BRL (25 CAD), comparativement à un chercheur qui doit déboursier une somme de 200 BRL (70 CAD), ce qui peut fortement encourager la présence de ces derniers à l'événement (SBCS, 2016).

Aussi, plusieurs congrès ont lieu chaque année au Brésil. D'abord, le *Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido* (CONIDIS) est né de l'idée de créer un dialogue favorisant les échanges et les discussions autour des nouvelles possibilités face aux expériences humaines dans le semi-aride. Il permet de mettre en contact les secteurs de l'académie et de la société civile. En passant par un éventail de thèmes accentués sur le semi-aride, il aborde la création du savoir, les richesses naturelles, la dégradation et l'utilisation durable de l'écosystème, la désertification, les technologies innovatrices et sociales, etc. (CONIDIS, 2017).

Un autre événement du genre qui se produit au pays est le *Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental* (CONGEA). Lors de celui-ci, les thèmes abordés concernent la gestion des aires dégradées et leur récupération, la législation environnementale, l'éducation environnementale, la durabilité des écosystèmes, etc. (IBEAS, 2018). Cette année, la rencontre aura lieu à São Paulo, alors qu'en 2016 elle a eu lieu dans le semi-aride, à Campina Grande, dans l'état de Paraíba (IBEAS, 2016).

Enfin, pour l'édition 2018, le *Congresso Internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente* avait comme thème central les innovations durables en temps de changement, considérant non seulement les défis environnementaux, mais aussi ceux qui sont d'ordres économiques et sociaux, tout en favorisant l'adoption de nouvelles idées et de technologies efficaces (UCS, 2018). Toutes ces rencontres annuelles

démontrent que les ressources humaines qui sont desservies par de nombreux spécialistes dans le domaine de la gestion des sols, de l'environnement, de l'assainissement des écosystèmes sont disponibles au pays.

Au niveau populationnel, des organisations professionnelles agricoles existent dans le Nord-est, il s'agit de syndicats, de coopératives et d'associations de producteurs. Ces regroupements permettent de faire vivre et de renforcer le développement local de l'agriculture familiale. D'abord, en ce qui concerne les syndicats, il y a le *Sindicatos de Trabalhadores Rurais* (STR) qui est un organe permettant de répondre aux besoins des agriculteurs. Il est un lieu de rencontres où des discussions entre les petits producteurs agricoles des municipalités peuvent avoir lieu et où des idées émergentes peuvent se transformer en projets (Malagodi & Bastos, 2003). Ainsi, le STR sert de catalyseur et de générateur de propositions concernant la durabilité de l'agriculture familiale. Par la suite, des revendications auprès des institutions financières peuvent être faites dans le but de libérer du crédit (Malagodi & Bastos, 2003).

Pour ce qui est des coopératives, celles-ci peuvent avoir accès à du crédit bonifié en plus d'avoir un statut d'entreprise et de ce fait, déclarer des profits, d'accumuler du capital et de redistribuer des bénéfices à ses membres (Sabourin, 2001). Dans la municipalité de Parelhas dans l'état du Rio Grande do Norte, les agriculteurs familiaux et les institutions partenaires se sont réunis pour former une coopérative qui avait comme but de promouvoir les bonnes pratiques et techniques de gestion des ressources naturelles dans le semi-aride, ainsi que de combattre la dégradation des sols. Ces actions sont nées de l'interaction entre un syndicat, le *Sindicato dos Trabalhadores Rurais e da Agricultura Familiar* (STTR), l'*Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural* (EMATER), la *Cooperativa Agropecuária do Seridó* (CAPESA), l'hôtel de ville de Parelhas et l'*Instituto Nacional do Semiárido* (INSA). Des ateliers et des activités formateurs ont été réalisés avec les participants et des semis indigènes ont été distribués aux agriculteurs (Amorim, 2016).

En ce qui concerne les associations, elles sont un modèle d'organisation basé localement et constitué par des agriculteurs familiaux. Les associations sont formées de manière volontaire dans le but d'assurer une défense d'intérêts communs et de gestion des biens communs. Comme avec les autres regroupements, l'accès aux financements est augmenté, ainsi que celui de l'approvisionnement aux équipements collectifs (Sabourin, 2001). Ainsi, le regroupement de personnes à l'échelle de la population sert de ligne directrice pour la gestion, l'entraide et les recours financiers des personnes concernées. L'organisation qui a pour but de mettre sur pieds des projets en phytoremédiation semble concluante, dans le sens où les différents paliers structurels nécessaires (universités, institutions, regroupements, etc.) sont déjà actifs dans le domaine de la dégradation et l'amélioration des sols, ainsi que dans celui du renforcement technique.

### 3.1.3 Analyse financière

L'étude de la faisabilité financière se base sur l'estimation des coûts dépensés et des revenus ou des bénéfices générés pour évaluer la rentabilité d'un projet. Par contre, les coûts produits ne peuvent pas toujours être connus ou quantifiables monétairement. En fait, les avantages de la phytoremédiation dans le Sertão ne sont pas forcément tous exprimés en valeur monétaire (Genest & Nguyen, 2010). De plus, un possible délai doit être attendu quant aux bénéfices pouvant être obtenus considérant qu'ils peuvent se produire plus tard (Genest & Nguyen, 2010). Les informations financières servent à établir une stratégie adéquate de planification du financement qui sera requis (Corriveau, 2012).

Actuellement, les coûts associés à la remédiation des sols contaminés sont très dispendieux, par exemple, aux États-Unis en 2004, 1,7 milliard USD ont été dépensés pour des projets utilisant ces techniques (Marques *et al.*, 2011). La phytoremédiation est considérée comme la technique de remédiation la moins dispendieuse. Elle serait même jusqu'à dix fois moins chère que les autres techniques (Peer *et al.*, 2006). Cependant, des coûts lui sont tout de même associés. Connaissant la situation financière des habitants du Sertão, il est primordial de bien connaître ce qui doit être déboursé pour s'assurer que le projet puisse aller de l'avant.

La phytoremédiation étant une technique émergente, les informations standardisées des coûts reliés ne sont pas facilement disponibles. De plus, ces coûts doivent être déterminés en fonction du site et de ses particularités (EPA, 2000). De nombreux paramètres peuvent cependant être pris en compte et incluent la main-d'œuvre, la planification, la caractérisation et la préparation du site, les analyses qui seront effectuées tout au long du projet, le matériel employé, l'équipement sur le terrain, les coûts reliés aux déchets et à la disposition des plantes contaminées, la maintenance et le suivi (Tableau 3.1). Néanmoins, ces coûts tendent à diminuer au fur et à mesure que le projet avance (EPA, 2000; ITRC, 2009).

**Tableau 3.1 Dépenses possibles à être considérées pour un projet en phytoremédiation**

<b>Coûts de conception</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation du site</li> <li>• Plan de travail et préparation du rapport</li> <li>• Essais pilotes</li> </ul> <b>Coûts d'installation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Préparation du site</li> <li>• Suppression des débris</li> </ul> Préparation du sol <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modification physique: labourage</li> <li>• Agents chélatants</li> <li>• Contrôle du pH</li> <li>• Drainage</li> </ul> Infrastructure <ul style="list-style-type: none"> <li>• Système d'irrigation</li> </ul> Clôture <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plantage</li> <li>• Graine, plantes</li> <li>• Main d'œuvre</li> <li>• Protection</li> </ul>	<b>Coûts d'exploitation</b> Maintenance <ul style="list-style-type: none"> <li>• Irrigation</li> <li>• Engrais</li> <li>• Contrôle du pH</li> <li>• Agents chélateurs</li> <li>• Plantage</li> </ul> Surveillance <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutriments du sol</li> <li>• pH du sol</li> <li>• Eau du sol</li> <li>• Statut des nutriments des plantes</li> <li>• Statut des contaminants des plantes (racines, tiges, feuilles)</li> <li>• Surveillance du flux de sève des arbres</li> <li>• Surveillance de l'air (feuilles, branches, arbre entier, zone)</li> <li>• Surveillance météorologique</li> </ul>
--	---

Modifié de: EPA (2000)

Traduction libre

Il existe au Brésil plusieurs institutions qui aident les agriculteurs dans leurs projets de développement en leur permettant de répondre à leur besoin en matière de financement. Des subventions peuvent être octroyées par les différentes parties prenantes pour la réalisation d'un projet. Souvent sous forme de crédit, ces subventions facilitent la production, la commercialisation et l'innovation des méthodes et procédures de planification et de production, bénéficiant au secteur rural.

D'abord, spécifiquement pour les habitants du Nord-est du pays, la *Banco do Nordeste* (BNB) offre un programme de financement, le *Programa de Financiamento à Sustentabilidade Ambiental* qui a comme objectif le développement d'entreprises par des activités économiques favorisant la préservation, la conservation, le contrôle et la valorisation de l'environnement, le tout focalisant sur la durabilité et la compétitivité entre les entreprises. Le programme permet de financer la mise en œuvre, l'expansion, la modernisation et la réforme d'entreprises, par des crédits, pour de nombreux projets, dont ceux qui concernent la récupération environnementale et la co-existence avec le climat semi-aride. Ceux-ci incluent les projets liés à la lutte contre la désertification et à l'atténuation des effets de la sécheresse. Aussi, ils incluent les projets qui promeuvent la récupération des aires dégradées par la salinisation, la compactation, la minéralisation, l'érosion, etc. Le contrôle, la prévention de la pollution, la dégradation environnementale, sous plusieurs formes (hydrique, du sol, de l'air, etc.) et qui peut impliquer l'identification, le diagnostique, l'intervention, la surveillance et les suivis d'aires contaminées, font

également parti de la liste de thèmes qui peuvent être utilisés lors d'une demande de subvention (BNB, 2018). Celle-ci est octroyée par le *Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste* (FNE), dont l'investissement, dans le secteur rural, peut être attribuée entre huit et 12 ans, avec quelques années supplémentaires.

La société publique *Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social* (BNDES) offre également du financement. D'ailleurs, elle est l'instrument principal de financement et d'investissement du gouvernement brésilien dans tous les secteurs de l'économie du pays. Les entrepreneurs y compris les particuliers peuvent être accompagnés dans la réalisation de leurs projets, tant et aussi longtemps qu'ils concernent la modernisation, l'expansion ou la création d'entreprises et tenant compte du potentiel d'emploi, de revenu, ainsi que de l'insertion sociale. L'institution vise l'encouragement de l'innovation, le développement régional et socio-environnemental (BNDES, 2018a).

Dans ses programmes, le *Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar* (Pronaf) offre plusieurs volets aux agriculteurs. Avec le Pronaf Eco, les agriculteurs et producteurs ruraux familiaux peuvent obtenir du financement par l'investissement dans les technologies d'énergies renouvelables et environnementales, de l'emmagasinement de l'eau, de l'adoption de pratiques de conservation et de correction de l'acidité, ainsi que de la fertilité du sol. Le programme vise la récupération et l'amélioration des capacités productive (BNDES, 2018b). Un point intéressant pour les agriculteurs concernés dans ce travail est que la protection, la correction et la récupération du sol, ce qui inclue l'acquisition, le transport, l'utilisation d'intrants, ainsi que les conseils techniques individuels pour l'entreprise peuvent être financés. Les projets peuvent atteindre un financement de 165 000 BRL (60 000 CAD) par année agricole ou 88 000 BRL (30 000 CAD) par bénéficiaire, avec un taux d'intérêt de 5,5% par an (BNDES, 2018b).

Le Pronaf Agroecologia, pour sa part, mise sur l'investissement dans les systèmes de production agroécologiques ou biologiques. Ils incluent les coûts reliés à l'implantation, la mise en œuvre et la maintenance du projet (BNDES, 2018c). Ce programme est une solution pour entamer la transition de l'utilisation des produits agrochimiques de synthèses pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. Le financement accordé de manière individuelle oscille entre 330 000 BRL (120 000 CAD) et 165 000 BRL, tandis que le financement collectif peut atteindre 800 000 BRL (290 000 CAD), considérant les limites individuelles. Les taux d'intérêt dans ce cas-ci sont de l'ordre de 2,5% par année (BNDES, 2018c).

De plus, le microcrédit, offert par la BNDES peut être une solution intéressante pour les agriculteurs à faible revenu (BNDES, 2018d). Il permet de lutter contre la pauvreté rurale en valorisant la production, la structuration, la diversification et peut financer des activités génératrices de revenus agricoles et non



agricoles. C'est le *Tesouro Nacional*, avec le FNE, celui du Nord (FNO) et du Centre-ouest (FCO) qui assurent le fonctionnement du microcrédit (MDA, 2018). Les personnes visées avec le microcrédit touchent les agriculteurs et les producteurs ruraux qui constituent des unités familiales liées à la production rurale. Ils doivent avoir obtenu un revenu familial brut pouvant atteindre 20 000 BRL (7 250 CAD) durant les 12 derniers mois de production normale qui précèdent la demande. Le financement par famille peut atteindre 15 000 BRL (5 300 CAD), avec une limite de 5 000 BRL (1 700 CAD) par personne (BNDES, 2018d). Les taux d'intérêt par année de financement sont de 0,5 % et le remboursement peut se faire jusqu'à deux ans après la remise du crédit (MDA, 2018). Comme pour le Pronaf Eco, avec le microcrédit, la protection, la correction et la récupération du sol, incluant l'acquisition, le transport et les intrants font partie du financement inhérent à ce programme. De plus, toute demande pouvant générer des revenus pour la famille et le bénéficiaire peut être considérée (BNDES, 2018d).

Ainsi, de nombreuses opportunités financières sont à la disposition des personnes désirant entreprendre des projets sur leur terre et contribuer à l'amélioration des conditions environnementales et sociales de leur région. De plus, les préoccupations qui concernent la récupération des terres dégradées par, entre autres, la salinisation sont d'une importance majeure. En fait, dans le semi-aride brésilien, ces changements positifs entraînent plusieurs avantages, dont celui de créer des emplois dans la région et de limiter l'exode rural, en plus des avantages de conservation de la biodiversité que ces changements apportent (Santos, 2016b). Ainsi, le financement qui peut être perçu par les personnes concernées dans la réalisation de projets de ce type sert de point de départ vers une avenue collective de développement de projets en phytoremédiation.

### **3.1.4 Analyse légale**

Les détails légaux encadrant et influençant l'établissement de tous projets doivent être étayés. L'analyse légale prend en compte tous les aspects réglementaires et évalue leurs implications juridiques, ainsi que leurs impacts. Ainsi, en fonction de ces éléments, la planification de chacun de ces aspects permet de faire le traitement de l'information à considérer (Corriveau, 2012). Dans cette section, les lois entourant l'environnement sont décrites.

Au Brésil, plusieurs lois régissent les mécanismes et applications de l'environnement. D'abord, la Loi N° 6.938, de 1981 a établi la Politique Nationale sur l'Environnement et a comme objectif de préserver, améliorer et récupérer la qualité de l'environnement. Ceci permet d'assurer au pays les conditions pour son développement socio-économique et la protection de la vie humaine. Dans le deuxième article de la Loi sur des principes gouvernementaux, l'utilisation rationnelle du sol, du sous-sol, de l'eau et de l'air figure en deuxième place après la considération de l'environnement comme patrimoine public qui doit être

protégé. Y est également inscrit, la récupération et la protection des aires dégradées ou menacées (Gouvernement du Brésil, 1981). Par la suite vint la Loi N° 10.406 de 2002 qui stipule, dans l'article 1.228, que le droit à la propriété doit être exercé conformément à ses objectifs économiques et sociaux et de manière à préserver la faune, la flore, les beautés naturelles et du même coup éviter la pollution de l'air et de l'eau (Gouvernement du Brésil, 2002).

La Résolution N° 420 de 2009 a établi quant à elle les standards fédéraux en matière de gestion environnementale des sites contaminés. Elle est détaillée en plusieurs étapes où ces sites doivent être identifiés, étudiés, classifiés, assainis et un suivi doit y être effectué (MMA, 2009). La contamination est définie comme la présence de substances chimiques qui se retrouvent dans l'air, l'eau, le sol et provenant d'activités anthropiques. Par contre, les sites où il y a une concentration de substances qui se produit naturellement ne peuvent être considérés contaminés, toutefois, des actions spécifiques de protection de la santé humaine doivent être implantées par le pouvoir public (MMA, 2009).

La Résolution restreint l'utilisation de ressources environnementales qui pourraient se faire au moment même ou plus tard. Ainsi, selon l'article 6, XVII, les techniques de remédiation étant une des actions d'intervention pour la réhabilitation des aires contaminées. De plus, le processus d'intervention est attribué à quiconque est responsable de la contamination. Pour ce faire, celui-ci doit veiller au contrôle et à l'élimination du contaminant. Il est responsable de la délimitation et de l'utilisation des zones des sols et eaux concernés, des coûts associés aux interventions nécessaires, ainsi que du suivi et de la surveillance. Malgré tout, la Résolution ne définit pas qui peut être tenu responsable et quelles sont les méthodes pour le déterminer (MMA, 2009).

La même année de l'établissement de la Résolution N° 420, l'état de São Paulo va encore plus loin en instaurant sa propre loi estatale, la Loi 13.577. Celle-ci traite de la protection de la qualité du sol contre les altérations nocives qui peuvent avoir lieu par la contamination. Elle identifie les responsables, c'est-à-dire toute personne qui de manière accidentelle ou volontaire a contaminé le sol. Les responsables ont l'obligation de réagir en adoptant les actions nécessaires limitant les altérations significatives du sol dans les aires concernées. Les états de la zone semi-aride n'ont, quant à eux, pas élaboré de Loi estatale concernant la protection de leurs sols sur leur territoire. Par contre, au Pernambuco, il existe, depuis 1998, le décret N° 20.423, qui vise à conserver et protéger les eaux souterraines. Par celui-ci, l'état souhaite, entre autres, limiter la contamination et la salinisation de ces eaux (Gouvernement du Brésil, 1998).

Concernant les organismes génétiquement modifiés (OGM) qui sont présentement sous investigations et utilisés pour la phytoremédiation, le *Conselho Nacional Do Meio Ambiente* (CONAMA) a établi, avec le Résolution N° 305 de 2002, les dispositions environnementales et les études d'impacts des OGM. Ainsi,

les plantes génétiquement modifiées ayant un potentiel pour la phytoremédiation sont soumises à un contrôle strict d'analyse des risques, dont celui de la vulnérabilité de l'environnement local (CONAMA, 2002).

Ainsi, il semble que le Brésil s'est doté de lois et de normes lui permettant de limiter, protéger ou traiter la contamination du sol par les polluants. Cependant, un flou juridique existe quant à la manière de déterminer qui est tenu responsable et à qui revient l'obligation de traiter un site contaminé. Dans un tel cas, aucune action ne pourrait être appliquée, ce qui laisserait les sites contaminés dans leur état actuel ou même aggraverait leur situation. De plus, mis à part quelques mentions concernant la salinisation, aucun support légal n'est déterminé spécifiquement dans le but de limiter, réduire, conserver ou remédier les aires affectées par ce phénomène.

Les lois existent sur papier, mais sur le terrain, elles ne sont pas forcément respectées par la population ou appliquées par le gouvernement responsable (Dourojeanni, 2014). La pauvreté serait un des facteurs importants au manque d'application des lois, même si la classe moyenne et les riches ne respectent pas systématiquement les lois. Le fait que les personnes n'ayant d'autres choix que de vivre là où elles vivent, par manque de ressources, favorise la violation des législations. De plus, il faut noter que les dimensions de la pauvreté au Brésil sont énormes et qu'un contrôle politique pour limiter les débordements réglementaires est difficile, d'autant plus qu'il y a une certaine acceptation de la société à ces violations et des intérêts politiques en jeu (Dourojeanni, 2014). Aussi, les entreprises n'obtiennent généralement que des sanctions légères qui entraînent de faibles coûts n'ayant pas de grands impacts sur leur économie. Ainsi, il semblerait qu'il serait plus avantageux de contourner le système juridique en place pour les profits générés et risquer les sanctions que d'appliquer les lois (Verdiano *et al.*, 2017).

Pour ce qui est du soutien légal financier auquel les agriculteurs et producteurs ont accès, il existe le *Fundo Nacional do Meio Ambiente* (FNMA), créé avec la Loi 7.797 de 1989. Le FNMA est une unité du MMA qui a comme mission de contribuer financièrement à des projets en conservation et en utilisation durable des ressources naturelles (Gouvernement du Brésil, 1989b). Depuis sa création, ce sont plus de 1 400 projets socioenvironnementaux qui ont été financés, avec des sommes allant à plusieurs centaines de millions de reais. Cette année, les représentants d'organisations non gouvernementales et d'organismes publics au niveau municipal, étatique et fédéral avaient jusqu'au 26 avril 2018 pour envoyer une proposition de projet concernant la récupération d'aires dégradées, l'agroécologie, l'usage de la végétation native, l'éducation, la gestion environnementale, etc. Le FNMA offre entre 100 000 et 300 000 BRL (35 000 et 100 000 CAD), totalisant une somme de 3 000 000 BRL (1 000 000 CAD) pour les projets qui seront retenus (MMA, s.d.).

Il existe également un programme de subvention, soit le *Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural* (PSR), qui est un instrument politique agricole qui a été créé en 2003 avec la Loi N° 10.823 et qui a comme but de réduire les risques inhérents aux activités rurales (Gouvernement du Brésil, 2010). Dans ces modalités, le programme offre une assurance pour la production: le *Programa de Garantia da Atividade Agropecuária* (PROAGRO). Celui-ci permet aux petits et moyens producteurs ruraux tout comme aux agriculteurs familiaux d'avoir accès à un crédit rural dans le cas de pertes de rendement qui seraient causées par des phénomènes naturels, des envahisseurs, des maladies, etc. De plus, ce programme promeut l'utilisation de la technologie en agriculture (MAPA, 2016). Ainsi, la phytoremédiation pourrait être incorporée dans le crédit obtenu par les producteurs et agriculteurs pour les soutenir dans leurs activités économiques.

### **3.1.5 Analyse sociale et environnementale**

L'étude de faisabilité sociale et environnementale permet d'identifier et de contrôler les impacts qui peuvent avoir lieu sur la population ou dans le sens contraire, les impacts que peuvent engendrer la population sur le projet. Ceci se fait en s'appuyant sur les enjeux sociaux et environnementaux correspondant à la région d'étude, c'est-à-dire, les caractéristiques et les indicateurs. Ensuite, des mesures sont développées afin d'optimiser ou d'atténuer les effets sur la population ou le projet, selon s'ils sont négatifs ou positifs (O'Shaughnessy, 2006). Des changements dans les habitudes de vie peuvent se produire ce qui peut également entraîner des difficultés à l'acceptation et la mise en place d'un projet, c'est pourquoi une telle analyse est essentielle.

Au Sertão, un des enjeux sociaux importants à mettre en lumière est sans doute l'implication de la population à des projets environnementaux. Le succès de la décontamination par la phytoremédiation des sols pollués passe nécessairement par l'intérêt que peut avoir la population à améliorer la qualité environnementale, mais aussi leur qualité de vie. En fait, il semblerait qu'il y ait une conscientisation et un intérêt environnemental chez les habitants du Sertão. Selon une étude effectuée avec les producteurs ruraux de la municipalité de Vitória da Conquista dans l'état de Bahia, 75 % des répondants ont mentionné que les problèmes environnementaux étaient la responsabilité de tous et que la collaboration était nécessaire pour les résoudre. Cependant, malgré la conscientisation de la problématique environnementale et les impacts négatifs causés par l'Homme sur la nature, aucune des personnes interrogées ne réalisait d'action collaborative pour diminuer les problèmes environnementaux de leur région. La réalisation de tels projets ne dépendrait pas seulement des producteurs ruraux, mais bien de l'application de politiques et d'une assistance technique. Dans les deux cas, ces éléments ne semblent actuellement pas encore être suffisants pour mettre en œuvre de tels projets (Guimarães *et al.*, 2013).

Nascimento *et al.* (2013) ont obtenu des résultats semblables, lors de leur étude à Ibimirim, une municipalité du Pernambuco. En effet, les agriculteurs avaient une perception environnementale claire des problèmes existants dans leur région. De plus, la majorité de ceux-ci possédait une bonne connaissance environnementale. Ils ont mentionné la pollution des eaux et du sol, le gaspillage de l'eau, la coupe forestière, les animaux, la salinisation du sol, l'usage inadéquat des pesticides et les infrastructures inadéquates comme problématiques environnementales. Quant aux solutions possibles qui devraient être appliquées dans leur région, il était question de la gestion durable de la Caatinga, l'adoption de politiques environnementales et de l'éducation environnementale (Nascimento *et al.*, 2013).

Au Brésil, l'augmentation graduelle du nombre d'agriculteurs biologiques, depuis les années 1970, montre également l'intérêt croissant de la population à la préoccupation des enjeux environnementaux et sociaux que l'agriculture conventionnelle apporte. Dans l'état de Ceará, par exemple, certaines initiatives provenant de systèmes agricoles alternatifs ont été implantées à plusieurs endroits, dont la majorité étant des systèmes biologiques (Alencar *et al.*, 2013). La région de la *Chapada da Ibiapaba* présente un développement significatif pour l'agriculture biologique. Certains agriculteurs conventionnels qui pratiquaient ce type d'agriculture se sont tournés vers la production biologique. En fait, les agriculteurs biologiques, en continuant de travailler conjointement avec ceux qui ne le sont pas, par en outre, le partage des traditions, la solidarité entre voisins et leur communauté et la destination des déchets semblent avoir une influence sur ces derniers en s'attirant leur sympathie et leur intérêt (Alencar *et al.*, 2013). D'ailleurs, l'*Associação para o Desenvolvimento da Agropecuária Orgânica* (ADAO), installée dans la capitale de l'état est constituée de 460 membres. Ceux adhérant à la production biologique visent principalement l'amélioration de leur qualité de vie par la non-utilisation de produits agrochimiques (Alencar *et al.*, 2013).

L'intérêt de la population envers l'environnement dépend en partie du niveau d'éducation de celle-ci. Pour cette raison, il est nécessaire que l'information soit bien distribuée. Il existe au Sertão un programme, créé en 2000, qui se nomme *Cultura da Paz* et qui vise l'éducation dans les écoles publiques et privées de 11 municipalités de la région du Rio São Francisco. Ce projet souhaite construire une nouvelle conscience citadine collective axée sur la famille, l'éducation, la dignité humaine, le respect et l'environnement (Araújo *et al.*, 2008).

Ainsi, sachant que la population du Sertão possède une certaine conscience environnementale des enjeux présents dans la région, il est envisageable d'intégrer la phytoremédiation sur les terres problématiques, car l'acceptabilité publique dépend aussi de la perception des risques humains et environnementaux qu'elle produit. De plus, pour que cette biotechnologie soit accueillie positivement et considérée comme une technique fiable de récupération des sols, les informations sur son application, son potentiel et ses

limites doivent être disponibles et transmis à la population (Marques *et al.*, 2011). Il a déjà été démontré que la phytoremédiation est une technique acceptée socialement ailleurs dans le monde pour ses nombreux avantages tant au plan financier qu'environnementale. Elle peut également être préférée aux autres techniques déjà disponibles sur le marché, car elle n'implique aucune pollution visuelle ou auditive, d'équipement lourd, d'excavations, etc. (Anselmo & Jones, 2005; Marques *et al.*, 2011).

La récupération des sols par la phytoremédiation peut également engendrer des avantages pour les propriétaires, car les sols une fois libérés des substances pouvant nuire à la production agricole peuvent offrir des bénéfices autant d'un point de vue financier que social, par entre autres la création d'emplois (Santos, 2016b). Des sols qui ne sont plus productifs à cause de la salinisation le redeviennent, après traitement, ce qui pourrait permettre de contrer l'abandon des terres, en plus de les rendre à nouveau productives.

Même s'il reste encore du travail à faire quant à l'application de moyens pour enrayer ou diminuer les impacts des problèmes environnementaux, les analyses ont permis de montrer l'intérêt de la population vers un changement social. Les prochaines étapes seraient de lier le développement économique et la préservation des ressources naturelles, comme le sol, source de vie. Ceci peut se faire par le renforcement des liens entre les habitants et les communautés, par la création d'organisations sociales, comme vu précédemment avec les coopératives ou encore les associations locales. Un sentiment de solidarité peut émerger de projets visant le changement des habitudes de vie, ainsi qu'avoir un impact social collectif favorable.

### **3.2 Recommandations et perspectives**

À la lumière du présent travail, il est possible de dresser une liste de recommandations qui devraient être appliquées dans le but d'améliorer l'usage qui est fait de la phytoremédiation et de l'amener à un niveau supérieur pour son application dans le Sertão. En fait, il a été démontré que de nombreux outils sont à la disposition des habitants de la région. Malgré tout, pour que de telles pratiques soient mises en place, des actions visant différents paliers organisationnels, c'est-à-dire la population locale, les organisations civiles ou privées ainsi que par le gouvernement fédéral devraient s'appliquer.

1. Pour qu'un projet de décontamination avec les plantes soit mis sur pied, l'information pertinente à la réalisation et au succès d'un tel projet doit être disponible. Actuellement, la phytoremédiation en sol semi-aride détient un fort potentiel, mais plus d'études doivent être réalisées pour connaître son impact et son efficacité chez les propriétaires de petites et moyennes terres. Ainsi, il est recommandé de poursuivre les recherches, particulièrement dans le domaine des pesticides, pour mieux comprendre

les interactions complexes qui se produisent entre les polluants, les plantes avec potentiel remédiateur, les différents types de sols, les micro-organismes présents, etc. Il faudrait être en mesure d'exploiter pleinement la biodiversité métabolique des plantes, en encourageant l'utilisation de plantes natives à la Caatinga ou d'espèces naturalisées largement utilisées en agriculture. De plus, plus d'études dans le domaine social devraient être entamées concernant la perception des propriétaires et des agriculteurs du Sertão. Ceci aurait comme but de connaître les besoins réels de ces habitants et d'établir le niveau de connaissance de cette pratique sur leur terre.

2. L'éducation environnementale devrait se faire dans les milieux ruraux, éloignés et isolés du Sertão, où justement il y a des problèmes de contamination des terres. L'EPA avait créé, à la fin des années 1990, un guide pour les citoyens (*Citizens' Guide*) qui décrivait de manière vulgarisée les traitements innovateurs de l'époque, dont celui de la phytoremédiation. En 2012, un nouveau guide actualisé a vu le jour (EPA, 2012). Ce même genre de guide devrait être conçu pour être appliqué spécifiquement à la région semi-aride du Brésil et qui concernerait les problématiques connues de la région. Le MMA, en partenariat avec des organisations locales oeuvrant en protection et en conservation de l'environnement, mais aussi avec la collaboration de spécialistes du domaine pourrait se charger de la création d'un livret de ce type. Celui-ci aurait la fonction d'éveiller les consciences en matière d'environnement, mais aussi d'informer la population sur la phytoremédiation. Ainsi, pour ceux désirant opter pour cette biotechnologie, l'information serait facilement accessible et permettrait du même coup d'encourager son application.
3. Une base de données devrait également être créée dans le but de rassembler l'information concernant les plantes ayant un fort potentiel remédiateur pour la région semi-aride et définir pour quel contaminant chacune des plantes opèrent. Aussi, les informations concernant les types de sols et dans quelle densité végétale ces plantes ont une meilleure croissance devraient être présentés de manière claire pour permettre sa reproduction à d'autres projets. Aussi, les projets réalisés et connaissant un succès ou des difficultés devraient également figurer dans la base de données, et ce, avec les détails impliquant les coûts et la durée de chacun des projets exécutés. Avec un tel registre, un réseau entre agriculteurs, producteurs, propriétaires de terres, universités, entreprises locales, etc., pourrait se construire. Comme avec le livret, la base de données aiderait à diffuser l'information sur la phytoremédiation et comment l'appliquer concrètement.
4. Les preneurs de décision devraient travailler conjointement avec les communautés pour leur permettre de développer des projets durables localisés sur leur territoire et pouvant améliorer leur qualité de vie.

Ainsi, des politiques publiques devraient être créées dans le but de répondre à la demande citoyenne pour une meilleure gestion des ressources environnementales (Guimarães *et al.*, 2013; Nascimento *et al.*, 2013). Les nouvelles politiques encourageraient, par exemple, le développement plus actif de la phytoremédiation dans le Sertão. Des partenariats devraient être créés entre les différents paliers gouvernementaux, que se soit au niveau fédéral, de l'état ou municipal, ainsi qu'avec les experts, provenant des universités et des centres de recherches oeuvrant dans différents domaines pouvant être utiles à des projets en phytoremédiation (Pires *et al.*, 2003). Ces collaborations auraient comme but d'unir les efforts vers un but commun et de faciliter les projets ayant en ce sens. Une telle restructuration des politiques municipales devrait en même temps augmenter les ressources financières qui sont destinées aux personnes aux prises avec des terres contaminées. Ceci encouragerait les agriculteurs à entamer des procédures pour la construction de projets allant en ce sens. De ce fait, ces derniers changeraient leurs habitudes de vie ce qui améliorerait leurs pratiques agricoles.

5. Il faudrait travailler à la source du problème de la contamination des sols, c'est-à-dire, en encourageant d'autres formes d'agriculture qui sont moins dommageables pour l'environnement, comme c'est le cas avec l'agriculture biologique qui est adaptée à la réalité de l'agriculture familiale. En fait, elle permet de créer des emplois et de stimuler l'économie, ainsi que l'approvisionnement des marchés locaux avec des aliments sains (Londres, 2011). De plus, les systèmes agroécologiques n'utilisent pas d'agrochimique de synthèse. Ainsi, ces méthodes permettraient de diminuer les intrants chimiques dans l'environnement. De plus, pour limiter la vitesse à laquelle le processus de salinisation s'opère dans les sols, l'agriculture sèche, c'est-à-dire sans utilisation de l'irrigation des eaux souterraines, pourrait aussi être encouragée. Pour parvenir à un changement global dans l'agriculture, l'éducation reste le meilleur moyen de diffusion de l'information. Ceci pourrait se faire sous forme d'ateliers et d'activités qui seraient développées pour les communautés rurales.
6. Les plantes ayant été utilisées pour décontaminer le sol devraient être valorisées une fois leur travail terminé. L'espèce *A. nummularia* peut déjà être employée pour servir d'aliment de fourrage pour le bétail, mais l'idée de valorisation des plantes après la phytoremédiation peut aller encore plus loin. En fait, la biomasse produite peut être économiquement rentable, par exemple d'un point de vue de la bioénergétique, avec la création de biogas, de biocarburant, de combustion pour la production d'énergie et de chauffage en sont quelques exemples (Gomes, 2012). Ceci pourrait être incité par le *Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel* (PNPB) qui vise à la mise en œuvre durable, technique et économique de la production et de l'utilisation du biodiesel au pays, tout en incluant le développement social et régional (Gouvernement du Brésil, 2018). Une autre idée serait que les



plantes pourraient être utilisées pour produire du compost (Mohanty, 2016). En plus, comme il y a une réduction de l'espace utilisé pour les cultures, l'utilisation subséquente de ces plantes est une solution pour contrebalancer cet espace non cultivé et de promouvoir une plus grande couverture végétale, ainsi qu'une protection du sol (Santos, 2012).

Suite à ces recommandations, il est nécessaire de prendre des initiatives pour le développement et la mise sur pied de projets concluants en phytoremédiation. L'idée que les plantes peuvent être utilisées pour décontaminer le sol et qu'elles soient utilisées dans les régions semi-arides par les propriétaires, agriculteurs ou producteurs est intéressante d'un point de vue social, environnemental et économique. À ce jour, les recherches se poursuivent et les avancées en la matière continuent d'être publiées. La phytoremédiation est beaucoup plus qu'une technique de décontamination des sols. Au Brésil et dans la région semi-aride, elle peut permettre à des centaines de familles de vivre en bénéficiant d'une qualité environnementale augmentée. En limitant l'érosion et la désertification, elle offre un habitat pour de nombreuses espèces et permet aux communautés rurales de poursuivre leurs activités économiques de manière durable.

## Conclusion

Dans un contexte semi-aride où la situation des habitants est souvent précaire, des technologies innovatrices doivent voir le jour dans le but de faire face aux problématiques environnementales et sociales. Elles doivent cependant être accessibles et durables pour qu'elles puissent être implantées avec succès. Ainsi, c'est dans une optique d'une conscience environnementale en croissance dans le monde et d'une vision plus verte des activités économiques que le présent travail s'inscrivait.

Il avait comme objectif, par l'élaboration des connaissances actuelles et par une analyse pluridimensionnelle, de déterminer le potentiel d'utilisation d'une biotechnologie, la phytoremédiation en sol semi-aride au Brésil. La réflexion portée sur ce travail s'est faite à l'échelle de la propriété privée, pour les petits et moyens propriétaires de terres. Elle a permis de mettre en lumière les différents aspects biophysiques, historiques et sociaux d'une région encore peu étudiée, le Nord-est du Brésil et plus précisément sa partie semi-aride, le Sertão. Les caractéristiques spécifiques à la région, dont la biodiversité unique de la Caatinga, le climat semi-aride, la pauvreté, le faible niveau d'éducation, les activités économiques et les types d'agriculture, entres autres, ont été traités. De plus, certains enjeux environnementaux non négligeables sont ressortis, dont celui de l'usage inadéquat du sol (Silva *et al.*, 2003). En fait, celui-ci aurait entraîné une pollution des terres en milieu agricole qui a, par la suite, engendré des répercussions négatives sur la santé humaine et la biodiversité de la région. L'usage démesuré des produits phytosanitaires, souvent sans contrôle, ainsi que l'irrigation excessive des terres dans un climat où l'évaporation est grande auraient laissé le paysage transformé. Par l'addition d'autres facteurs, la dégradation des terres s'accroît constamment, entraînant avec elle la désertification (Coelho *et al.*, 2016).

Face à la problématique de la pollution des terres par les activités anthropiques, les principes de la phytoremédiation et son fonctionnement ont été élaborés. Ils ont permis de déterminer pour quels paramètres les plantes doivent opérer. Les études et les avancées effectuées sur ce sujet en territoire brésilien et particulièrement dans la zone semi-aride ont également été mises en lumière. Ceci a permis de déterminer pour quelles plantes, quelles substances organiques, comme les pesticides ou inorganiques comme les sels, elles peuvent être efficaces, considérant les aspects physico-chimiques et climatiques de la région. De plus, les contraintes et les limites ont également été traitées dans le but de donner les lignes directrices pour les projets à être développés.

L'analyse a également servi à identifier, en prenant en compte les éléments d'ordre technique, organisationnel, financier, légal, social et environnemental, quels instruments sont disponibles et quels

aspects sont à améliorer afin de rendre la phytoremédiation accessible et efficace à la population pour son implantation dans le en contexte particulier du Sertão. Ensuite, par l'entremise de recommandations, des solutions ont été proposées (continuer les recherches, faire l'éducation environnementale, créer des partenariats entre les différents paliers de la population, etc.). Il est donc possible d'aller de l'avant avec la mise en place de projets liés à la phytoremédiation, car de nombreux outils ou moyens pour parvenir à son développement sont en place. Une vision plus claire des perspectives et des démarches à suivre peuvent alors guider les travaux sur le terrain.

Enfin, il reste encore beaucoup à explorer quant à la phytoremédiation, cette technique qui gagne en popularité au Brésil dans la communauté scientifique. Néanmoins, suite à son analyse, l'implantation d'une telle biotechnologie au niveau de la propriété privée semble possible, tant et aussi longtemps que les différents acteurs travaillent conjointement dans le but commun de rendre l'environnement plus sain et de développer une agriculture respectueuse de l'environnement.

## Références

- Albuquerque, U.P., Araújo, E.L., El-Deir, A.C.A., Lima, A.L.A., Soutu, A., Bezerra, B.M., Nogueira Ferraz, E.M., Freire, E.M.X., Sampaio, E.V.S.B., Las-Casas, F.M.G. & al., (2012). Caatinga Revisited: Ecology and Conservation of an Important Seasonal Dry Forest. *The Scientific World Journal*, vol. 2012, p. 1-18.
- Alencar, G.V., Mendonça, E.S., Oliveira, T.S., Jucksh, I. & Cecon, P.R. (2013). Percepção Ambiental e Uso do Solo por Agricultores de Sistemas Orgânicos e Convencionais na Chapada da Ibiapaba, Ceará. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, vol. 51, no 2, p. 217-236.
- Alves, J.J.A., Araújo, M.A. & Nascimento, S.S. (2009). Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Revista Caatinga*, vol. 22, no 3, p. 126-135.
- Amorim, R. (2016). SNCT-Projeto realiza ações de combate à desertificação para agricultores do núcleo de desertificação do seridó. In Gouvernement du Brésil, INSA. <https://portal.insa.gov.br/noticias/288-projeto-realiza-acoes-de-recuperacao-de-solos-no-nucleo-de-desertificacao-do-serido> (Page consultée le 14 mai 2018).
- Andrade, J.R., Maia Junior, S.O., Silva, P.F., Barbosa, J.W.S., Nascimento, R. & Sousa, J.S. (2013). Crescimento inicial de genótipos de feijão caupi submetidos à diferentes níveis de água salina. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, vol. 9, no 4, p. 38-43.
- Andrade, M.C. (1989). L'intervention de l'État et la sécheresse dans le Nordeste du Brésil. In Bret, B., *Les Hommes face aux sécheresses: Nordeste brésilien, Sahel afriacain* (p.391-398), Paris, Éditions de l'IHEAL.
- Andreazza, R., Bortolon, L., Pieniz, S., Bento, F.M. & Camargo, F.A.O.(2015). Evaluation of two Brazilian indigenous plants for phytostabilization and phytoremediation of copper-contaminated soils. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 75, no 4, p. 868-877.
- Araújo, M.J., Magalhães, J.B.S. Santos, L.A. (2008). *Educação para uma cultura de paz no sertão pernambucano: desafios, caminhos e ações*. São Paulo, VI Encontro Internacional do Fórum Paulo Freire, 8 p.
- Araújo, E.L., Castro, C.C. & Albuquerque, U.P. (2007). Dynamics of Brazilian Caatinga – A Review Concerning the Plants, Environment and People. *Functional Ecosystems and communities*, vol. 1, no 1, p. 15-28.
- Araújo, F.S., Rodal, M.J.N., Barbosa, M.R.V. & Martins, F.R. (2005) Repartição da flora lenhosa no domínio da Caatinga. In Araújo, F.S., Rodal, M.J.N. & Barbosa, M.R.V., *Análise das variações da biodiversidade do bioma Caatinga, suporte a estratégias regionais de conservação* (p. 16-33), Brasília, MMA (Ministério do Meio Ambiente).
- Araújo, S.A.M., Silveira, J.A.G., Almeida, T.D., Rocha, I.M.A., Morais, D.L. & Viégas, R.A. (2006). Salinity tolerance of halophyte *Atriplex nummularia* L. grown under increasing NaCl levels. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 10, no 4 p.848-854.
- Araújo Filho, J.C. (2011). *Relação solo e paisagem no bioma Caatinga*. Recife, Universidade Federal da Grande Dourados, 24 p.

- Augusto, L.G.S. (2003). Uso dos agrotóxicos no semi-árido brasileiro. In Peres, F. & Moreira, J.C., *É veneno ou é remédio?: agrotóxicos, saúde e ambiente* (p. 59-73). Rio de Janeiro, Fiocruz.
- AVINSA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) (2016). Proibido uso de agrotóxicos com Parationa Metilica. In Gouvernement du Brésil, AVINSA. [http://portal.anvisa.gov.br/noticias/-/asset\\_publisher/FXrpx9qY7FbU/content/proibido-uso-de-agrotoxicos-com-parationa-metilica/219201?p\\_p\\_auth=HFYqawEL&inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fportal.anvisa.gov.br%2Fnoticias%3Fp\\_p\\_auth%3DHFYqawEL%26p\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_FXrpx9qY7FbU%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D2](http://portal.anvisa.gov.br/noticias/-/asset_publisher/FXrpx9qY7FbU/content/proibido-uso-de-agrotoxicos-com-parationa-metilica/219201?p_p_auth=HFYqawEL&inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fportal.anvisa.gov.br%2Fnoticias%3Fp_p_auth%3DHFYqawEL%26p_p_id%3D101_INSTANCE_FXrpx9qY7FbU%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2) (Page consultée le 7 février 2018).
- AVINSA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) (2018). Regularização de Produtos – Agrotóxicos, Reavaliação de Agrotóxicos. In Gouvernement du Brésil, AVINSA. <http://portal.anvisa.gov.br/registros-e-autorizacoes/agrotoxicos/produtos/reavaliacao-de-agrotoxicos> (Page consultée le 6 février 2018).
- Barreto, F.A.F.D. & Menezes, A.S.B. (2014). *Desenvolvimento econômico do ceará: evidências recentes e reflexes*. Fortaleza, IPECE (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará), 402 p.
- Barrigossi, J.A.F., Lanna, A.C. & Ferreira, E. (2005). *Inseticidas Registrados para a Cultura do Arroz e Análise de Parâmetros Indicadores de seu Comportamento no Ambiente*. Santo Antônio de Goiás, Embrapa, 4 p.
- Batista, J.L.O. & Santos, R.L. (2011). Análise da dinâmica do uso e ocupação da terra em pequenos municípios baianos do semi-árido brasileiro: o caso de Teofilândia. *Revista de Geografia Norte Grande*, vol. 49, p.139-155.
- Batista, N. & Campos, C.H. (2017). Caracterização do Semiárido brasileiro. In Gouvernement du Brésil, Conselho Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional. <http://www4.planalto.gov.br/consea/comunicacao/artigos/2014/caracterizacao-do-semiarido-brasileiro-1> (Page consultée le 16 février 2018).
- Baunthiyal, M. (2014). Engineering Plants for Phytoremediation. In Ravi, I., Baunthiyal, M. & Saxena, J., *Advances in Biothechnology* (p. 227-240). New Delhi, Springer Science & Business Media.
- Belo, A.F. (2006). *Técnicas para fitorremediação de solo contaminado com herbicidas*. Thèse de maîtrise, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 56 p.
- Beltrão, N.E.M., Vale, L.S., Marques, L.F., Cardoso, G.D. & Souto, J.S. (2010). Consórcio mamona e amendoim: opção para a agricultura familiar. *Revista Verde*, vol. 5, no 4, p. 222-227.
- Bétard, F. (2011). De la gestion traditionnelle des terres à la gestion agroécologique des sols dans le - Sertão brésilien : la clé d'un développement agricole durable ? *Norois*, vol. 218, no 1, p. 57-71.
- Blanco, F. M. G., Velini, E. D. & Batista Filho, A. (2010). Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. *Bragantia*, vol. 69, no 1, p. 71-75.
- BNB (Banco do Nordeste) (2018). Programa de Financiamento à Sustentabilidade Ambiental - FNE VERDE. In Gouvernement du Brésil, BNB. <https://www.bnb.gov.br/programa-de-financiamento-a-sustentabilidade-ambiental-fne-verde> (Page consultée le 12 mai 2018).

- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (2018a). Quem somos. *In* BNDES, *BNDES*. <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home> (Page consultée le 12 mai 2018).
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (2018b). Pronaf Eco. *In* BNDES, *BNDES*. <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf-eco> (Page consultée le 12 mai 2018).
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (2018c). Pronaf Agroecologia. *In* BNDES, *BNDES*. <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf-agroecologia/> (Page consultée le 12 mai 2018).
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (2018d). BNDES Microcrédito. *In* BNDES, *BNDES*. <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/bndes-microcredito/bndes-microcredito> (Page consultée le 12 mai 2018).
- Braga, R.R., Dos Santos, J.B., Zanuncio, J.C., Bibiano, C.S., Ferreira, E.A., Oliveira, M.C., Valadão, D.S. & Serrão, J.E. (2016). Effect of growing *Brachiria brizantha* on phytoremediation of picloram under different pH environments. *Ecological Engineering*, vol. 94, p.102-106.
- Burney, J., Cesano, D., Russell, J., Rovere, E.L., Corral, T., Coelho, N.S. & Santos, L. (2014). Climate change adaptation strategies for smallholder farmers in the Brazilian Sertão. *Climatic Change*, vol. 126, p. 45-59.
- Cadier, E. (1994). *Hidrologia das pequenas bacias do nordeste semi árido*. Recife, Ministério da Integração Regional Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 476 p. [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_7/divers2/010031008.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010031008.pdf) (Page consultée le 9 janvier 2018).
- Caldas, E.D. (2016). *Pesticide Poisoning in Brazil*, University of Brasilia, Brasilia, 9 p.
- Caron, P. & Sabourin, É. (2001). *Paysans du Sertão: mutations des agricultures familiales dans le Nordeste du Brésil*. Quae, 243 p.
- Carreiro, D.A. & Leite, J.C.A (2017). *Fitorremediação de solos salinizados no semiárido brasileiro: uma revisão de literatura*. Campina Grande, II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido, 6 p.
- Castro, C.N.A. (2013). A agricultura no Nordeste brasileiro: oportunidades e limitações ao desenvolvimento. *Boletim regional, urbano e ambiental*, vol.8, no 2, p.77-89.
- Castro, M.G.M., Ferreira, A.P. & Mattos, I.E. (2011). Uso de agrotóxicos em assentamentos de reforma agrária no Município de Russas (Ceará, Brasil): um estudo de caso. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, vol. 20, no 2, p. 245-254.
- Cerqueira, G.S., Arruda, V.R., Freitas, A.P.F., Oliviera, T.L., Vasconcelos, T.C. & Mariz, S.R. (2010). Dados da exposição ocupacional aos agrotóxicos em um grupo assistido por uma unidade básica de saúde na cidade de cajazeiras, PB. *Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, vol. 3, no 1, p. 16-28.

- Cerqueira, W. (2010). O Nordeste e as Sub-Regiões. *In* Mundo Educação. UOB. <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/o-nordeste-as-subregioes.htm> (Page consultée le 13 mars 2018).
- Coêlho, J.G.S., Araújo, J., Lima, A.K.V.O. & Pereira, F.C. (2016). *Fitorremediação na recuperação de áreas degradadas e combate à desertificação: estado da arte*. Joao Pessoa, I Congresso Internacional das Ciências Agrárias, 8 p.
- CONAMA (Conselho Nacional Do Meio Ambiente) (2002). *Resolução CONAMA nº 305, de 12 de junho de 2002*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 9 p.
- CONIDIS (Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido) (2017). Conheça Melhor o II CONIDIS. *In* CONIDIS, *CONIDIS*. <http://www.conidis.com.br/sobre.php> (Page consultée le 11 mai 2018).
- Correia, R.C., Kiill, L.H.P., Moura, M.S.B., Cunha, T.J.F., Júnior, L.A.J. & Araújo, J.L.P. (2005). A região semiárida Brasileira. *In* Kiill, L.H.P & Menezes, E.A., *Espécies Vegetais Exóticas com Potencialidades para o Semi-árido Brasileiro* (p .21-48). Brasília, EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).
- Corriveau, G. (2012). *Guide pratique pour étudier la faisabilité de projets*. Québec, Presse de l'Université du Québec, 354 p.
- Cortez, A.O. (2007). *Sorção, dessorção e seleção de espécies vegetais para remediação de solo contaminado com ametryn*. Dissertation de maitrise en environnement, technologie et société, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brésil, 62 p.
- Coutinho, M.J.F., Carneiro, M.S.S., Edvan, R.L. & Pinto, A.P. (2013). A pecuária como atividade estabilizadora no semiárido brasileiro. *Veterinária e Zootecnia*, vol. 20, no 3, p. 9-17.
- Cunha, T.J.F., Petrere, V.G., Silva, D.J., Mendes, A.M.S., Melo, R.F., Neto, M.B.O., Silva, M.S.L. & Alvarez, I.A. (2010). Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. *In* Sá, I.B. & Silva, P.C.G., *Semiárido brasileiro: pesquisa desenvolvimento e inovação* (p. 51-88). Petrolina, Embrapa.
- Cunningham, S.D. & Ow, D.W. (1996). Promises and Prospects of Phytoremediation. *Plant Physiology*, vol. 110, p. 71 5-71 9.
- Cunningham, S. D., Shann, J. R., Crowley, D.E. & Anderson, T.D. (1997). Phytoremediation of Contaminated Water and Soil. *In* Kruger, E.L., Aderson, T.A. & Coats, J.R. *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants* (p. 2-17). Washington, DC, American Chemical Society.
- Davis, L.C. (2006). Genetic engineering, ecosystem change, and agriculture: an update. *Biotechnology and Molecular Biology Review*, vol. 1, no 3, p. 87-102.
- Devinny, J., Longcore, T., Bina, A., Kitts, C. & Osborne, K.H. (2005). *Phytoremediation with Native Plants*, Los Angeles, University of Southern California, 63 p.
- Dias, N.S., Blanco, F.F. (2010). Efeitos dos sais no solo e na planta. *In*: Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F. *Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados* (p. 129-141). Fortaleza, INCTSal.

- Dinardi, A. L., Formagi, V.M., Coneglian, C.M.R., Brito, N.N., Sobrinho, G.D., Tonso, S. & Pelegrini, R. (2003). *Fitorremediação*. São Paulo. Universidade Estadual de Campinas, 15 p.
- Dourojeanni, M. (2014). O povo não respeita e os governos não aplicam. In *O Eco*, Jornalismo Ambiental. <http://www.oeco.org.br/colunas/marc-dourojeanni/27928-o-povo-nao-respeita-e-os-governos-nao-aplicam/> (Page consultée le 18 mai 2018).
- Drumond, M.A., Kiill, L.H.P., Lima, P.C.F., Oliveira, M.C., Oliveira, V.R., Albuquerque, S.G., Nascimento, C.E.S., Cavalcanti, J. (2000). *Avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga*. Petrolina, Embrapa, 23 p.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (2001). *Degradação de terras por salinidade no Nordeste do Brasil e medição instrumental da salinidade*. Petrolina, Embrapa, 30 p.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (2013). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 3ª ed.* Brasília, Embrapa, 353 p.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (2014). *Solos do Nordeste. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*. Recife, Embrapa, 8 p.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (2018). Fitorremediação. In Embrapa, *Embrapa, Pecuária e Abastecimento*. <https://www.embrapa.br/busca-geral/-/busca/fitorremedia%C3%A7ao?buscaPortal=fitorremedia%C3%A7ao> (Page consultée le 11 mai 2018).
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (2000). *Introduction to Phytoremediation*. Cincinnati, National Risk Management Research Laboratory, 72 p.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (2012). *A Citizen's Guide to Phytoremediation*. Washington, EPA, 2 p.
- Etchevarne, C. (2000). A ocupação humana do nordeste brasileiro antes da colonização portuguesa. *Revista USP*, no 44, p. 112-141.
- Evenson, R. E. & Gollin, D. (2003). Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, vol. 300, no 5620, p. 758-762.
- FAO (Organisations des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (2014). *The International Code of Conduct on Pesticide Management*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 37 p.
- FAO (Organisations des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (2017). Gros plan sur la pollution des sols. In FAO, *FAO*. <http://www.fao.org/news/story/fr/item/897474/icode/> (Page consultée le 8 mai 2018).
- Fernandes, J.G., Freire, M.B.G.S., Cunha, J.C., Galvinctio, J.D., Correia, M.M. & Santos, P.R. (2009). Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II Serra Talhada. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, vol. 4, no 1, p 27-34.



- Ferreira, U.C.Q., Queiro, W.N. & Beltrão, N.E.M. (2009). Fitotoxicidade e seletividade do herbicida trifloxysulfuron sodium na mamona cultivar BRS Nordestina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 13, p.916-921.
- Filho, F.D.A (2011). Sobre a palavra “Sertão”: Origens, significados e usos no Brasil (do ponto de vista da ciência geográfica). *Ciência Geográfica*, vol. 15, no 1, p.
- Freire, M.B.G.S. & Freire, F.J. (2007). Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In Novais, R. F., Alvarez, V.H. Barros, N.F., Fontes, R.L., Cantarutti, R.B., Neves, C.L., *Fertilidade do solo* (p. 929-954). Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Gamma, A.F., Oliveira, A.H.B., Cavalcante, R.M. (2013). Inventário de agrotóxicos e risco de contaminação química dos recursos hídricos no semiárido cearense. *Química Nova*, vol. 36, no 3, p. 462-467.
- Gariglio, M.A., Sampaio, E.V.S.B., Cestaro, L.A. & Kageyama, P. Y. (2010). *Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 367 p. [http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/arquivos/web\\_uso\\_sustentvel\\_e\\_conservao\\_dos\\_recursos\\_florestais\\_da\\_caatinga\\_95.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/arquivos/web_uso_sustentvel_e_conservao_dos_recursos_florestais_da_caatinga_95.pdf) (Page consultée le 15 janvier 2018).
- Gavrilescu, M. (2005). Fate of Pesticides in the Environnement and its Bioremediation. *Enginnering in Life Science*, vol. 5, no 6, p. 497-526.
- Genest, B-A. & Nguyen, T.H. (2010). *Principes et techniques de gestion de projets*, 4e éd. Laval, Sigma Delta, 516 p.
- Giongo, V., Salviano, A.M., Angelotti, F., Taura, T., Leite, L.F.C. & Cunha, T.J.F. (2018). Low Carbon Technologies for Agriculture in Dryland: Brazilian Experience. ). In Rao, C.S., Shanker, A.K. & Shanker, C., *Climate Resilient Agriculture - Strategies and Perspectives* (p. 105-128). London, IntechOpen.
- Giulietti, A.M., Neta, A.L.B., Castro, A.A.J.F., Gamarra-Rojas, C.F.L., Sampaio, E.V.S.B., Virginio, J.F., Queiroz, L.P., Figueiredo, M.A., Rodal, M.J.N., Barbosa, M.R.V. & Harley, R.M. (2004). Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. In Silva, J.M.C. Tabarelli, M., Fonseca, M.T. & Lins, L.V. *Biodiversidade da caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação* (p. 48-77). Brasília, Ministério do Meio Ambiente.
- Gomes, H.I. (2012). Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. *Environmental Technology Reviews*, vol. 1, no. 1, p. 59-66.
- Gouvernement du Brésil (1965). Lei nº 4.785, de 6 de outubro de 1965. In Gouvernement du Brésil, *Câmara dos Deputados*. <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-4785-6-outubro-1965-368355-publicacaooriginal-1-pl.html> (Page consultée le 31 janvier 2018).
- Gouvernement du Brésil (1981). Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. In Gouvernement du Brésil, *Planalto Predidência da Republica*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/16938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm) (Page consultée le 7 avril 2018).
- Gouvernement du Brésil (1985). Portaria Nº 329, de 02 de Setembro de 1985. In Gouvernement du Brésil, *Ministério da Saude*. [http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/mapa\\_gm/1985/prt0329\\_02\\_09\\_1985.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/mapa_gm/1985/prt0329_02_09_1985.html) (Page consultée le 19 février 2018).

- Gouvernement du Brésil (1989a). Lei Nº 7.802, de 11 de julho de 1989. *In* Gouvernement du Brésil, *Planalto Presidência da Republica*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L7802.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7802.htm) (Page consultée le 31 janvier 2018).
- Gouvernement du Brésil (1989b). Lei Nº 7.797, de 10 de Julho de 1989. *In* Gouvernement du Brésil, *Planalto*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/17797.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17797.htm) (Page consultée le 14 mai 2018).
- Gouvernement du Brésil (1998). Decreto nº 20.423, de 26 de março de 1998 regulamenta a lei Nº 11.427 de 17/01/97 dá outras providências. *In* Gouvernement du Brésil, *Agência Pernambucana de Aguas e Clima*. [http://www.apac.pe.gov.br/legislacao/decreto\\_n\\_20423\\_de\\_26\\_de\\_marco\\_de\\_1998.pdf](http://www.apac.pe.gov.br/legislacao/decreto_n_20423_de_26_de_marco_de_1998.pdf) (page consultée le 18 mai 2018).
- Gouvernement du Brésil (2002). Lei Nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. *In* Gouvernement du Brésil. *Planalto Presidência da Republica*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/110406.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110406.htm) (Page consultée le 7 avril 2018).
- Gouvernement du Brésil (2006). Lei Nº 11.326, de 24 de Julho de 2006. *In* Gouvernement du Brésil, *Planalto Presidência da Republica*. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2006/Lei/L11326.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11326.htm) (Page consultée le 16 février 2018).
- Gouvernement du Brésil (2010). Lei Nº 10.823, de 19 de dezembro de 2003. *In* Gouvernement du Brésil. *Planalto Presidência da Republica*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2003/L10.823.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.823.htm) (Page consultée le 4 mai 2018).
- Gouvernement du Brésil (2012a). Educação, Censo 2010 mostra as características da população brasileira. *In* Gouvernement du Brésil, *Gouvernement du Brésil*. <http://www.brasil.gov.br/educacao/2012/07/censo-2010-mostra-as-diferencas-entre-caracteristicas-gerais-da-populacao-brasileira>. (Page consultée le 17 janvier 2018).
- Gouvernement du Brésil (2012b). Saiba como é a divisão do sistema de educação brasileiro. *In* Gouvernement du Brésil, *Gouvernement du Brésil*. <http://www.brasil.gov.br/educacao/2014/05/saiba-como-e-a-divisao-do-sistema-de-educacao-brasileiro/view> (Page consultée le 17 janvier 2018).
- Gouvernement du Brésil (2018). O que é o programa nacional de produção e uso do biodiesel – PNPB. *In* Gouvernement du Brésil, *MDA*. <http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-biodiesel/o-que-%C3%A9-o-programa-nacional-de-produ%C3%A7%C3%A3o-e-uso-do-biodiesel-pnpb> (Page consultée le 15 mai 2018).
- Greipsson, S. (2011) Phytoremediation. *Nature Education Knowledge*, vol. 3, no 10. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/phytoremediation-17359669> (Page consultée le 26 février 2018).
- Gressel, J. & Al-Ahmad, H. (2005). Assessing and Managing Biological Risks of Plants Used for Bioremediation, Including Risks of Transgene Flow. *Zeitschrift für Naturforschung*, vol. 60, p. 154-165.
- Guimarães, S.O. & Paula, A. (2013). Análise da percepção ambiental de produtores rurais do assentamento Amaralina, Vitória da Conquista – BA. *Enciclopédia Biosfera*, vol. 9, no 16, p.1662-1680.

- Harms, H., Bokern, M., Kolb, M. & Bock, C. (2003). Transformation of organic contaminants by different plant systems. In McCutcheon, S.C. & Schnoor, J.L. *Phytoremediation. Transformation and control of contaminants* (p 285-316), Hoboken, Wiley-Interscience.
- Holanda Junior, E.V. & Lima, E.P. (2006). *Utilização de áreas comunitárias para produção de caprinos e o caso dos fundos de pasto do Semi-árido baiano*. Fortaleza, Embrapa, 9 p.
- IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) (2010). *Produtos agrotóxicos e afins comercializados em 2009 no Brasil: uma abordagem ambiental*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente (MMA), 159 p.
- IBEAS (Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais) (2016). Anais - Congressos Brasileiros de Gestão Ambiental. In IBEAS, *IBEAS*. <http://www.ibeas.org.br/congresso/congresso7.htm> (Page consultée le 11 mai 2018).
- IBEAS (Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais) (2018). IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. In IBEAS, *IBEAS*. <http://www.ibeas.org.br/congresso9/conteudo.php?id=6> (Page consultée le 11 mai 2018).
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2004). IBGE lança o Mapa de Biomas do Brasil e o Mapa de Vegetação do Brasil, em comemoração ao Dia Mundial da Biodiversidade. In *Gouvernement du Brésil, Agência IBGE Notícia*. <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/12789-asi-ibge-lanca-o-mapa-de-biomas-do-brasil-e-o-mapa-de-vegetacao-do-brasil-em-comemoracao-ao-dia-mundial-da-biodiversidade.html> (Page consultée le 5 janvier 2017).
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2012). *Censo Demográfico 2010, Resultados gerais da amostra*. Rio de Janeiro, IBGE, 65 p.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2014). *Estatísticas de Gênero, Uma análise dos resultados do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro, IBGE, 162 p.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2016). Em 2015, esperança de vida ao nascer era de 75,5 anos. In IBGE, *Agência IBGE Notícias*. <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/9490-em-2015-esperanca-de-vida-ao-nascer-era-de-75-5-anos.html> (Page consultée le 16 janvier 2018).
- INSA (Instituto Nacional do Semiárido) (2014). População do Semiárido Estimada para 2014. In Governo do Brasil, *INSA*. [http://sigsab.insa.gov.br/static/themes/v1/lib/elfinder/Arquivos/Publica%C3%A7%C3%B5es/Popula%C3%A7%C3%A3o%20do%20Semi%C3%A1rido%20Estimada%20para%202014\\_S%C3%ADntese.pdf](http://sigsab.insa.gov.br/static/themes/v1/lib/elfinder/Arquivos/Publica%C3%A7%C3%B5es/Popula%C3%A7%C3%A3o%20do%20Semi%C3%A1rido%20Estimada%20para%202014_S%C3%ADntese.pdf) (Page consultée le 16 janvier 2018).
- IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco) (2002). *Manejo e utilização da palma forrageira (Opuntia e Nopalea) em Pernambuco*. Recife, Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária, 53 p.
- IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco) (2004). Empresa pernambucana de pesquisa agropecuária – IPA. *Atriplex nummularia*. In Instituto Agrônomo de Pernambuco, *IPA*. <http://www.ipa.br/resp11.htm>. (Page consultée le 1 mars 2018).

- ITRC (The Interstate Technology & Regulatory Council Phytotechnologies Team) (2009). *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised*. Washington, ITRC Phytotechnologies Team, 130 p.
- Klamt, E. & Kauffman, J.H. (1985). *The Brazilian System of Soil Classification*. Rio Grande do Sul International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 16 p.
- Kohler, H. C. (2003). Aspectos geoecológicos da bacia hidrográfica do São Francisco (primeira aproximação na escala 1:1 000 000). In: H.P., Godinho & A.L., Godinho, *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (p. 25-35). Belo Horizonte, PUC Minas.
- Labuto, G. & Carrilho, E.N.V.M. (2016). Bioremediation in Brazil: Scope and Challenges to Boost Up the Bioeconomy. In Prasad, M.S.V., *Bioremediation and Bioeconomy* (p.569-588). Amsterdam, Elsevier.
- LAPIS (Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites) (2017). Monitoramento ambiental feito por Laboratório da Ufal oferece resultados inovadores para novo Semiárido brasileiro. In Universidade Federal de Alagoas, *UFAL edu*. [www.ufal.edu.br/noticias/2018/1/monitoramento-ambiental-feito-por-laboratorio-da-ufal-oferece-resultados-inovadores-para-novo-semiarido-brasileiro](http://www.ufal.edu.br/noticias/2018/1/monitoramento-ambiental-feito-por-laboratorio-da-ufal-oferece-resultados-inovadores-para-novo-semiarido-brasileiro) (Page consultée le 7 mai 2018).
- Leal, I.G., Accioly, A.M.A., Nascimento, C.W.A., Freire, M.B.G.S., Montenegro A.A.A. & Ferreira, F.L. (2008). Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 32, p. 1065-1072.
- Leal, I.R., Silvam J.M.C., Tabarelli, M. & Lacher JR., T.E. (2005). Changing the Course of Biodiversity Conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. *Conservation Biology*, vol. 19, no 3, p. 701-706.
- Leprun, J-C. (1994). Effets de la mise en valeur sur la dégradation physique des sols, Bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. *Etude et Gestion des Sols*, no 1, p. 45-65.
- Lima, C.J.G.S., Oliveira, F.A., Medeiros, J.F., Oliveira, M.K.T. & Almeida Júnior, A.B. (2007). Resposta do feijão caupi a salinidade da água de irrigação. *Revista Verde*, vol. 2, no 2, p. 79-86.
- Lima. J.P.R. & Gatto, M.F. (2013). A economia do semiárido de Pernambuco: ainda “sem produção”? *Economia e Desenvolvimento*, vol. 12, no 2, p. 130-167.
- Lira, M.A., Santos, M.V.F., Cunha, M.V., Mello, A.C.L. Farias, I. & Santos, D.C. (2005). Utilização da palma forrageira na pecuária leiteira do semi-árido. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, vol 2, p.107-120.
- Loiola, M.I.B., Roque, A.A. & Oliveira, A.C.P. (2012). Caatinga: Vegetação do semiárido brasileiro. *Ecologia*, vol. 4, p.14-19.
- Londres, F. (2011). *Agrotóxicos no Brasil: Um guia para ação em defesa da vida, 1ère éd*. Rio de Janeiro, Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa (ASPTA), 188 p.
- Lopes, D. (2010). Plantas nativas do Cerrado uma alternativa para fitorremediação. *Goiânia*, vol. 37, no 3/4, p. 419-437.

- Lopes, D.C. & Neto, A.J.S. (2011). Potential Crops for Biodiesel Production in Brazil: A Review. *World Journal of Agricultural Sciences*, vol. 7, no 2, p.206-217.
- Luz, S., El-Deir, A., França, E. & Severi, W. (2009). Estrutura da assembléia de peixes de uma lagoa marginal desconectada do rio, no submédio Rio São Francisco, Pernambuco. *Biota Neotropica*, vol. 9, no. 3, p. 117-129.
- Maestri, E. & Marmioli, N. (2011). Transgenic Plants for Phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 13 no S1, p. 264-279.
- Major, I., Sales Jr., L.G. & Castro, R. (2004). *Aves da Caatinga - Birds of the Caatinga*. Fortaleza, Democrito Rocha, 256 p.
- Malagodi, E. & Bastos, V.S. (2003). *Sindicato de trabalhadores rurais e agricultura familiar*. Campinas, UNICAMP, 10 p.
- Malavolta, E., Vitti, G. C. & Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações, 2e éd.* Piracicaba, POTAFOS, 319 p.
- MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) (2016). Proagro. In Gouvernement du Brésil, *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*. <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-os-seguro/risco-agropecuário/proagro> (Page consultée le 4 mai 2018).
- Marengo, J.A., Alves, L.M., Alvala, R.C.S., Cunha, P.A., Brito, S. & Moraes, O.L.L. (2017). Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, p.1-13.
- Marques, M., Aguiar, C.R.C., & Silva, J.J.L.S. (2011). Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos Contaminados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 35, p. 1-11.
- MDA (Ministério do Desenvolvimento Agrário) (2010). *Plano territorial de desenvolvimento rural sustentável do sertão produtivo*. Caetité, MDA, 121 p.
- MDA (Ministério do Desenvolvimento Agrário) (2018). SAF. In MDA, *Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário*. <http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-creditorural/microcr%C3%A9dito-rural> (Page consultée le 13 mai 2018).
- MDS (Ministério da Saúde) (2017). *O que é?* In Gouvernement du Brésil, *Ministério da Saúde*. <http://bolsafamilia.datasus.gov.br/w3c/bfa.asp> (Page consultée le 17 janvier 2018).
- MEC (Ministério da Educação) (2002). *Estrutura geral do sistema educacional*. Brasília, Ministério da Educação de Brasil, 7 p. file:///C:/Users/pc/Downloads/OEi%20me%20educacao.pdf (Page consultée le 17 janvier 2018).
- Medeiros, E.S.F. & Maltchik, L. (2001). Diversity and Stability of Fishes (Teleostei) in a Temporary River of the Brazilian Semiarid Region. *Iheringia: Série Zoologia*, no. 90, p. 157-166.
- Mello, I.N.K. & Silveira, W.F. (2012). Resíduos de agrotóxicos em produtos de origem animal. *Acta Veterinaria Brasilica*, vol. 6, no 2, p. 94-104.

- Melo, J.C. (1999). O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. *Raízes*, année 18, no 20, p. 13-21.
- Melo, M. R., Barros, C. F. M., Santos, M. P., Rolim, M. M. (2008). Correção de solos salino-sódicos pela aplicação de gesso mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 12, no. 4, p. 376-380.
- Melo, R. F., Brito, L.T. L., Giongo, V., Angelotti, F. & Miguel, A.A. (2010). Pesticidas e seus impactos no ambiente. In Brito, L.T.L., Melo, R.F. & Giongo, V., *Impactos ambientais causados pela agricultura no Sertão brasileiro* (p.101-136). Petrolina, Embrapa.
- Mendez, M.O. & Maier, R.M. (2007). Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments - An Emerging Remediation Technology. *Environnemental Health Perspectives*, vol. 116, no 3, p. 278-283.
- Miller, P.G.R.R. (1996). *Phytoremediation*. Pittsburgh, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 11 p.
- Miranda, M.F.A. (2013). *Diagnóstico e recuperação de solos afetados por sais em Perímetro Irrigado do Sertão de Pernambuco*. Thèse de doctorat, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brésil, 102 p.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente) (s.d.). (Fundo Nacional do Meio Ambiente – FNMA. In Gouvernement du Brésil. *ICMBio*. <http://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/destaques/88-fundo-nacional-do-meio-ambiente-fnma.html> (Page consultée le 14 mai 2018).
- MMA (Ministério do Meio Ambiente) (2009). Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009. In Gouvernement du Brésil, *Ministério do Meio Ambiente*. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf> (Page consultée le 7 février 2018).
- Nascimento, J.K.A., Passos, C.A.P., Almeida, I.M.S., Aguiar, W.J. & Maia, F.J.F. (2013). *Percepção dos agricultores do município de Ibimirim/PE quanto aos principais problemas ambientais da região*. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Nero, L.A., Mattos, M.R., Beloti, V., Barros, M.A.F., Netto, D.P. & Franco, B.D.G.M. (2007). Organofosforados e carbamatos no leite produzido em quatro regiões leiteiras no Brasil: Ocorrência e ação sobre *Listeria monocytogenes* e *Salmonella* spp. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, vol. 27, no 1, p. 201-204.
- Neto, A.J.L., Nunes, J.C., Melo, D.R.M., Fernandes, D. & Júnior, E.S.N. (2009). Uso de agrotóxicos e utilização de equipamento de proteção individual por produtores no sertão paraibano. *Revista Verde*, vol. 4, no 4, p. 107-114.
- Neto, M.D.S., Almeida, W.C., Junior, G.G.L. & Neto, N.C.N. (2003). *A importância estratégica do submédio da bacia hidrográfica do Rio São Francisco no semiárido*. Salvador, Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 4 p.
- Nimer, E. (1972). Climatologia Nordeste da Região do Brasil, Introdução Climatologia Dinâmica, Subsídios à Geografia Regional do Brasil. *Revista brasileira de geografia*, année 34, no 2, p. 3-51.

- O'Shaughnessy, W. (2006). *La conception et l'évaluation de projet, 2e tome*. Trois-Rivières, Les Éditions SMG, 314 p.
- Ojima, R. & Fusco, W. (2014). *Migrações nordestinas no século 21*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 197 p. <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/openaccess/migracoes-nordestinas/completo.pdf> (Page consultée le 16 janvier 2018).
- Oliveira, F.S., Oliveira, F.S., Silva, R.A., Dantas, A.M.M. & Farias, O.R (2014). Registro do primeiro cultivo de alfafa no Sertão Paraibano. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, vol 9, no 4, p. 207-211.
- Oliveira, J.A., Gonçalves, P.R. & Bonvicino, C.R. (2003). Mamíferos da Caatinga. In Leal I.R., Tabarelli, M. & Silva, J.M.C., *Ecologia e Conservação da Caatinga*. (p. 275-302). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Oliveira, K.F. & Jannuzzi, P.M. (2005). Motivos para migração no Brasil e retorno ao Nordeste, padrões etários, por sexo e origem/destino. *São Paulo Em Perspectiva*, vol. 19, no 4, p.134-143.
- Oliveira-Filho, J.C., Carmo, P.M.S., Pierezan, F., Tochetto, C., Lucena, R.B., Rissi, D.R., Barros, C.S.L. (2010). Intoxicação por organofosforado em bovinos no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, vol. 30, no 10, p.803-806.
- Pequeno, O.T.B.L., Silva, J.L.B.C & Nascimento Brasileiro, I.M. (2014). Fitoextração de sais através de estresse salino por *Atriplex nummularia* em solo do semiárido paraibano. *Revista Saúde e Ciência*, vol. 3, no 3, p. 37-52.
- Peres, F., Moreira, J.C., & Dubois, G.S. (2003). Agrotóxicos, saúde e ambiente: uma introdução ao tema. In Peres, F. & Moreira, J.C. *É veneno ou é remédio? agrotóxicos, saúde e ambiente* (p. 21-43). Rio de Janeiro, Fiocruz.
- Peres, M.A.C. (2011). Velhice e analfabetismo, uma relação paradoxal: a exclusão educacional em contextos rurais da região Nordeste. *Revista Sociedade e Estado*, vol. 26, no 3, p.631-661.
- Perez-Marin, A.M., Cavalcante, A.M.B., Medeiros, S.S., Tinôco, L.B.M. & Salcedo, I.H. (2012). Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica? *Parcerias Estratégicas*, vol. 17, no 34, p. 87-106.
- Pero, V. (2012). Bolsa Família : une nouvelle génération de programmes sociaux au Brésil. In Centre de recherches internationales, *CERISCOPE*. <http://ceriscope.sciences-po.fr/print/331?page=3> (Page consultée le 17 janvier 2018).
- Phytorestore (2016). Phytorestore Brasil. In Phytorestore, *Phytorestore Brasil*®. <http://clientes.aioria.com.br/phyto/phytorestore/home-2/> (Page consultée le 11 mai 2018).
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, vol. 56, p.15-39.
- Pompeu, R.C.F.F., Uchoa, F.C., Neiva, J.N.M., Oliveira Filho, G.S., Paula Neto, F.L., Silva, E.S., Lobo, R.N. B. & Botrel, M.A. (2003). Produção de matéria seca e qualidade de quatorze cultivares de alfafa (*Medicago sativa* L.) sob irrigação no Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, vol. 34, no 2, p. 153-160.

- Porto, E.R., Amorim, M.M.C. & Júnior, L.G.A.S. (2001). Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol 5, no 1, p.111-114.
- Porto, E.R. & Araújo, G.G.L (1999). *Instruções Técnicas da Embrapa Semi-Arido Petrolina, Erva sal (Atriplex nummularia)*. Petrolina, Embrapa, 5 p.
- Porto, E.R., Araújo, O., Araújo, G.G.L., Amorim, M.C.C., Paulino, R.V. & Matos, A.N.B. (2004). *Sistema de Produção Integrado Usando Efluentes da Dessalinização*. Petrolina, Embrapa, 25 p.
- Prado, D.E. (2003). As Caatingas da América do Sul. In Leal I.R., Tabarelli, M. & Silva, J.M.C., *Ecologia e Conservação da Caatinga*. (p. 3-74). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Procópio, S.O., Pires, F.R., Santos, J.B. & Silva, A.A. (2009). *Fitorremediação de solos com resíduos de herbiciadas*. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 32 p.
- Ribeiro, M.R., Freire, F.J. & Montenegro, A.A.A. (2003). Solos halomoficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In Curi, N., Marques, J.J., Guilherme, L.R.G., Lima, J.M., Lopes, A.S., Alvares, V. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, vol 3, p. 165-208.
- Ribeiro, M.R., Ribeiro Filho, M.R. & Jacomine, P.K.T. (2016). Origem e classificação dos solos afetados por sais. In Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F., Gomes Filho, E., *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados* (p. 9-16), Fortaleza, INCTSal.
- Ribeiro, M.R., Sampaio, E.V.S.B. & Galindo, I.C.L. (2009). Os solos e o processo de desertificação no Semiárido brasileiro. *Tópicos em ciência do solo*, no 6, p. 319-412.
- Rissato, S.R., Galhiane, M.S., Fernandes J.R., Gerenutti, M., Gomes, H.M., Ribeiro, R. & Almeida, M.V. (2015). Evaluation of *Ricinus communis* L. for the Phytoremediation of Polluted Soil with Organochlorine Pesticides. *BioMed Research International*, vol. 2015, p.1-8, <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2015/549863/> (Page consultée le 5 mai 2018).
- Rocha, A.P.B., Dantas, E.M., Morais, I.R.D. & Oliveira, M.S. (2011). *Geografia do Nordeste*, 2<sup>ª</sup> éd. Natal, EDUFRN (Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte), p. 332.
- Rodrigues, C.T.A., Silva, T.G.F., Carvalho, H.F.S., Magna Soelma Beserra de Moura, M.S.B. (2017). Definição de ambientes de produção para a cultura da *Atriplex* no estado de Pernambuco. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, vol. 2, no 3, p. 302-311.
- Rodrigues, M.T. (2003). Herpetofauna da Caatinga. In Leal I.R., Tabarelli, M. & Silva, J.M.C., *Ecologia e Conservação da Caatinga*. (p. 181-236). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Rodrigues, R.R. & McPhaden, M.J. (2014). Why did the 2011-2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? *Geophysical Research Letters*, vol. 4, p. 1012-1018.
- Rosa, R.S., Menezes, N.A., Britski, H.A., Costa, W.J.E.M. & Groth, F. (2003). Abelhas da Caatinga: biogeografia, ecologia e conservação. In Leal I.R., Tabarelli, M. & Silva, J.M.C., *Ecologia e Conservação da Caatinga*. (p. 135-180). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Ross, J.L.S. (2005). *Geografia do Brasil*. São Paulo, EDUSP (Editora da Universidade de São Paulo), p 546.



- Sampaio Y. & Batista J.E.M. (2004). Desenvolvimento regional e pressões antrópicas no bioma Caatinga. In Sampaio Y. & Batista J.E.M., *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação* (p. 311-324). Brasília, Ministério do Meio Ambiente.
- Santos, C.F. & Novak, E. (2013). Plantas nativas do Cerrado e possibilidades em fitorremediação. *Revista de Ciências Ambientais*, vol. 7, no 1, p. 67-77.
- Santos, J.C., Leal, I.R., Almeida-Cortez, J.S., Fernandes, G.W., & Tabarelli, M. (2011). Caatinga: The Scientific Negligence Experienced by a Dry Tropical Forest. *Tropical Conservation Science*, vol. 4, no 3, p. 276-286.
- Santos, J.S., Xavier, A.A.O., Ries, E.F., Costabeber, I.H. & Emanuelli, T. (2006). Níveis de organoclorados em queijos produzidos no Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, vol. 36, no 2, p. 630- 635.
- Santos, M.A. (2012). *Recuperação de solo salino-sódico por fitorremediação com Atriplex nummularia ou aplicação de gesso*. Dissertation de maitrise, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil, 89 p.
- Santos, M.A. (2016b). *Adaptabilidade e potencial fitorremediador de espécies vegetais em solo salino*. Thèse de doctorat, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, Brasil, 119 p.
- Santos, M.C. (2017). *Solos do semiárido do Brasil*. Pernambuco, Academia Brasileira de Ciência Agrônômica, 55 p.
- Santos, M.G. (2016a). A cultura quilombola e sua presença nos espaços urbanos. *Studium Educationis*, année 17, no 1, p. 31-41.
- Sarcinelli, P.N (2003). A Exposição de Crianças e Adolescentes a Agrotóxicos. In Peres, F. & Moreira, J.C., *É veneno ou é remédio?: agrotóxicos, saúde e ambiente* (p. 43-58). . Rio de Janeiro, Fiocruz.
- SBCS(Sociedade Brasileira de Ciência do Solo) (2016). III Reunião nordestina de ciência do solo. In SBCS Núcleo Regional Nordeste, SBCS. <http://www.sbc-snrne.org.br/eventos/sbcs/III-REUNIO-NORDESTINA-DE-CINCIA-DO-SOLO/35> (Page consultée le 11 mai 2018).
- SER (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group) (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Tucson, Society for Ecological Restoration International, 13 p. [https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682\\_SERPrimer.pdf](https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SERPrimer.pdf) (Page consultée le 13 mars 2018).
- Siciliano, S.D. & Germida, J.J. (1998). Mechanisms of phytoremediation: biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. *Environnemental Reviews*, vol. 6, p. 65-79.
- Silva, A.O., Bassoi, L.H., Silva, E.F.F., Klar, A.E. & Lira, R.M. (2013). *Evolução da salinidade do solo por aplicação de fertilizantes em cultivo de beterraba fertirrigado*. Fortaleza, XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 4 p.
- Silva, C.F.M. & Freitas N.B. (2017). *Pobreza e desigualdade no sertão semiárido da Bahia: uma explicação a partir da análise socioambiental da desertificação no pólo de Jeremoabo*. Feira de Santana, Universidade Estadual de Feira de Santana, 4 p.

- Silva, J.D.G., Souza, A.M.O., Oliveira, E.E.M., Pessoa, L.G.M. & Freire M.B.G.S. (2014). Distribuição de sais em área degradada do perímetro irrigado do moxotó, Ibimirim - Pernambuco. *II Inovagri International Meeting*, p. 4078-4088.
- Silva, J.M.C., Souza, M.A., Bieber, A.G.D. & Carlos, C.J. (2003). Aves da Caatinga: status, uso do habitat e sensibilidade. In Leal I.R., Tabarelli, M. & Silva, J.M.C., *Ecologia e Conservação da Caatinga*. (p. 237-274). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Silva, P.C.G. & Filho, C.G. (2006). Eixo tecnológico da ecorregião Nordeste. In Sousa, I.S.F., *Agricultura Familiar na Dinâmica da Pesquisa Agropecuária* (p. 109-161). Brasília, MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento).
- Silva, P.T., Lima, P.A. & Bebé, F.V. (2016a). Desafios da agricultura familiar no Brasil e no território Sertão produtivo-BA. *Revista eletrônica de culturas e educação*, année 5, no 10, p. 1-15.
- Silva, R.Z., Gonçalves, F.M.F., Souza, D.P., Berti, J.A., Reis, A.S., Vieceli, T.H.A. & Conte, A.M. (2016b). Fitorremediação de solos salinos em sistema de cultivo protegido. *Cultivando o Saber*, vol. 9, no 4, p. 498-505.
- Souto, J.S., Oliveira, F.T., Gomes, M.M.S., Nascimento, J.P. & Souto, P.C. (2009). Efeito da aplicação de fósforo no desenvolvimento de plantas de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill sp). *Revista Verde*, vol.4, no1, p.135-140.
- Souza, M.D., Boeira, R.C., Gomes, M.A.F., Ferracini, V.L. & Maia, A.H.N. (2001). Adsorção e lixiviação de tebutiuron em três tipos de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol 25, no 4, p. 1053-1061.
- Suassuna, J. (1996). *O processo de salinização das águas superficiais e subterrâneas no nordeste brasileiro*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 20 p.
- Suassuna, J. (2002). Semi-Árido: proposta de convivência com a seca. In *Gouvernement du Brésil, Fundação Joaquim Nabuco*. [http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com\\_content&id=659&Itemid=376](http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&id=659&Itemid=376) (Page consultée le 11 mai 2018).
- SUCEN (Superintendência de Controle de Endemias) s.d. CLASSIFICAÇÃO. In *Gouvernement du Brésil, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria da Saúde*. <http://www.saude.sp.gov.br/resources/sucen/programas/arquivos-seguranca-do-trabalho/sequi2.pdf> (Page consultée le 7 février 2018).
- Susarla, S. Medina, V.F., McCutcheon, S.C. (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, vol. 18, p. 647-658.
- Tabarelli, M., & Vicente, A. (2004). Conhecimento sobre plantas lenhosas da Caatinga: lacunas geográficas e ecológicas. In J.M.C. Silva, M. Tabarelli, M. Fonseca & L. Lins, *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação* (p.101-111). Brasília, Ministério do Meio Ambiente.
- UCS (Universidade de Caxias do Sul) (2018). 6 ° Congresso Internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente. In UCS, *Siambiental*. <https://siambiental.ucs.br/congresso/> (Page consultée le 11 mai 2018).

- Vasconcellos, M.C., Pagliuso, D. & Sotomaior, V.S. (2012). Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. *Revista Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade*, vol. 34, no 83, p. 261-267.
- Vasconcellos, M.C. (2014). Salinização do solo em áreas irrigadas: Aspectos físicos e químicos. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, vol. 10, no 1, p. 20-25.
- Verdiano, A.S., Aeroza, A.M.V., Jesus, J.M., Moura, N.E.A. & Machado, C.C.L. (2017). Problemáticas da legislação ambiental Brasileira. In Jusbrasil, Jusbrasil. <https://jemersonmoreira.jusbrasil.com.br/artigos/469080712/problematicas-da-legislacao-ambiental-brasileira> (Page consultée le 18 mai 2018).
- Vergolino, E.B., Pinheiro, W., Santos, C.F. & Lima Y.G.S. (2016). Indígenas do Sertão pernambucano: as escolas formais. *Educação, Tecnologia e Cultura*, no 13. <http://www.publicacoes.ifba.edu.br/index.php/etc/article/view/29> (Page consultée le 17 janvier 2018).
- Vidal, D.L. (2011). Fator trabalho no manejo rural no semiárido Nordeste, Brasil. *Archivos Zootecnica*, vol. 60, no 232, p.1137-1148.
- Vier, P.U. (2013). *Produção do capim-milheto (Pennisetum americanum L. Leake) submetido a diferentes níveis de adubação*. Dissertation de maitrise, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brésil, 41 p.
- Vieira, G.E.G., Silveira, S.R., Cutrim, J., Ribeiro, J. (2011). Avaliação dos principais aspectos da fitorremediação aplicados na redução da poluição no solo e água. *Engenharia Ambiental*, vol. 8, no 2, p. 182-192.
- Vilela, H. (2009). Série Gramíneas Tropicais - Gênero Pennisetum (Pennisetum americanum - Milheto). In Portal Agronomia, Agronomia, O portal da Ciência e Tecnologia. [http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos\\_gramineas\\_tropicais\\_pennisetum\\_americanum.htm](http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_gramineas_tropicais_pennisetum_americanum.htm) (Page consultée le 27 mars 2018).
- Vishnoi, S.R. & Srivastava, P.N. (2008). Phytoremediation - Green for Environmental Clean. *The 12<sup>th</sup> World Lake Conference*, p. 1016-1021.
- Wanderley, R. A. (2009). *Salinização de solos sob aplicação de rejeito de dessalinizadores com e sem adição de fertilizantes*. Dissertation de maitrise, Universidade de Federal Rural de Pernambuco, Recife, 52 p.
- Warrier, R.R. (2012). Phytoremediation for Environmental Clean Up. *Forestry Bulletin*, vol. 12, no 2, p. 1-7.
- Zanella, F.C.V. & Martins, C.F. (2003). Abelhas da Caatinga: biogeografia, ecologia e conservação. In Leal I.R., Tabarelli, M. & Silva, J.M.C., *Ecologia e Conservação da Caatinga*. (p. 75-134). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.